后倾乘员在MPDB碰撞中的腰椎生物力学响应与胸部损伤风险

肖宗瀚[1] 潘 迪[1,2] 黄志山[1] 刘 慧[1,2] 吕晓江[3] 韩 勇[1,2*]
1.厦门理工学院机械与汽车工程学院,厦门,361024
2.福建省客车先进设计与制造重点实验室,厦门,361024
3.吉利汽车研究院(宁波)有限公司,宁波,315336

摘要:为研究后倾乘员在50%重叠移动渐进变形壁障碰撞中的腰椎生物力学响应及胸部损伤风险,采用THUMS人体有限元模型并按照2024版C-NCAP法规进行了三组仿真。仿真发现,后倾乘员脚部与内饰踏板的接触会显著影响乘员下潜的发生概率;若后倾乘员在碰撞过程中出现"勒脖子"现象,则胸部最大压缩量可能无法有效评估胸部损伤风险;随着靠背倾角的增大,腰椎椎体所受轴向压缩力增大;不同姿态下的腰椎弯曲旋转中心与最大弯曲力矩椎体存在对应关系;后倾乘员的腰椎整体表现出大幅度的S形侧倾运动,腰椎承受压缩、弯曲、侧倾三种载荷。

关键词:腰椎载荷;胸部损伤;后倾乘员;50%重叠移动渐进变形壁障碰撞;下潜
中图分类号:U461.4
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.07.016 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Lumbar Spine Biomechanical Responses and Chest Injury Risks for Reclined Occupants under MPDB Impact

XIAO Zonghan[1] PAN Di[1,2] HUANG Zhishan[1] LIU Hui[1,2] LYU Xiaojiang[3] HAN Yong[1,2*]
1.School of Mechanical and Automotive Engineering Xiamen Institute of Technology, Xiamen, Fujian, 361024
2.Fujian Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing of Buses, Xiamen, Fujian, 361024
3.Geely Automobile Research Institute, Ningbo, Zhejiang, 315336

Abstract: To investigate the lumbar spine biomechanical responses and chest injury risk of reclined occupants in a 50% overlap MPDB crash, three sets of simulations are conducted using the THUMS finite element human body model in accordance with the 2024 version of the C-NCAP protocol. The results indicate that foot-interior footrest contact significantly influences the probability of submarining. When a "belt-on-neck" phenomenon occurs for the reclined occupant during the crash, maximum chest compression alone may not adequately reflect the chest injury risk. The axial compressive force on the lumbar vertebrae increases progressively with increasing seatback recline angle. Under different postures, a correspondence exists between the lumbar bending center of rotation and the vertebra sustaining the maximum bending moment. The overall lumbar spine of the reclined occupant exhibits a pronounced S-shaped lateral bending motion and is subjected to combined compression, bending, and lateral bending loads.

Key words: lumbar spine loading; chest injury; reclined occupant; mobile progressive deformable barrier (MPDB); submarining

0 引言

自动驾驶技术的飞快发展使驾驶员逐渐从驾驶任务中解放出来,人们对车内空间布局的灵活性、乘坐姿态的舒适性也提出更高要求。ÖSTLING等[1]发现,L5级自动驾驶技术车辆的座椅倾斜甚至放平功能很重要。该发现与先前SOFIA等[2]的调查结果相同。在此背景下,零重力座椅凭借独特的人体工程学设计,获得广大消费者的青睐。DISSANAIKE等[3]统计分析美国NASS-CDS事故数据库发现后倾姿态会显著增大死亡风险。SCHAEFER等[4]通过统计分析德国深度事故数据库(German in-depth accident study,GIDAS)发现,后倾姿态会显著增大人体各

收稿日期:2025-07-10
基金项目:福建省自然科学基金(2024J02031);厦门市自然科学基金(3502Z20227223);厦门理工学院高层次人才项目(YKJ23014R)

部位的损伤风险。传统约束系统的设计开发基于乘员标准直立坐姿，车辆发生正面碰撞事故时，处于后倾坐姿的乘员存在较高损伤风险。

探究后倾乘员在正面碰撞中的损伤机制，优化乘员约束系统设计并提高后倾乘员的安全防护效能是当前乘员保护领域的研究重点。现有试验研究表明，相较于直立姿态，后倾乘员的腰椎和胸部在正面碰撞中更容易发生严重损伤。RICHARDSON等[5-6]通过后倾50°、车速50 km/h的正面碰撞台车试验发现，上躯干前向的惯性导致腰椎承受压缩-弯曲复合载荷，出现L1腰椎骨折；肩带的不良约束作用导致胸骨骨折与肋骨骨折。BAUDRIT等[7]在座椅靠背角度为58°的正面碰撞台车试验中同样观察到肋骨骨折、胸骨骨折、腰椎间盘破裂、腰椎椎体骨折。SHIN等[8]在靠背角度50°的50 km/h正面碰撞台车试验中发现被试对象出现L1椎体骨折。针对后倾乘员特有的腰椎及下潜损伤，诸多学者提出防护措施，如抬高坐垫角度[9]，加装坐垫气囊和膝部气囊[10]、座椅轨道限力器和坐垫限力器[11]，座椅集成安全带[12]，并借助人体有限元模型（THUMS、GHBMC、SAFER）验证防护效果。上述防护方式在阻止乘员下潜时导致腰椎承受更大载荷，因此，兼顾腰椎与下潜损伤的防护应成为后倾乘员碰撞安全研究的重点[13]。后倾乘员正面碰撞试验中的腰椎高损伤风险推动腰椎损伤评价标准的发展，为后倾乘员防护技术的优化提供重要依据。TUSHAK等[14]在试验得到压缩-弯曲复合载荷（轴向压缩力3290 N、弯曲力矩51 N·m）腰椎损伤阈值后，提出压缩-弯曲复合载荷的腰椎损伤风险函数（IRF）[15]。腰椎损伤评价标准的制定需要损伤机制全面且深入的研究。

目前，针对50%重叠移动渐进变形壁障（mobile progressive deformable barrier，MPDB）碰撞的后倾乘员腰椎载荷研究相对较少。本文以2024版C-NCAP法规的正面50%重叠MPDB碰撞工况为边界条件，采用丰田中央研究所开发的THUMS V6.1人体有限元模型和经过验证的雅阁汽车有限元模型，深入探究MPDB碰撞中，后倾乘员的腰椎生物力学响应及胸部损伤风险。

1　材料与方法

1.1　有限元碰撞模型

如图1所示，本文研究采用美国国家公路交通安全管理局（NHTSA）开发的2011款Accord整车有限元模型。该模型自带座椅骨架，但需添加头枕、靠背、坐垫等发泡部件。根据NHTSA的对标试验报告，整车有限元模型和实车碰撞试验的车辆变形基本一致，左侧B柱加速度曲线吻合良好，整车有限元模型在正面碰撞下有效[16]。研究采用满足2024版C-NCAP法规对质量和几何尺寸要求的MPDB有限元模型。乘员模型为丰田中央研究所开发的THUMS Ver 6.1第50百分位男性人体有限元模型（身高175 cm，体重77 kg），模型的腰椎和胸部生物力学响应已经过相关验证[17]，可用于乘员腰椎和胸部损伤研究。

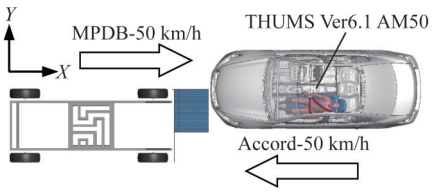
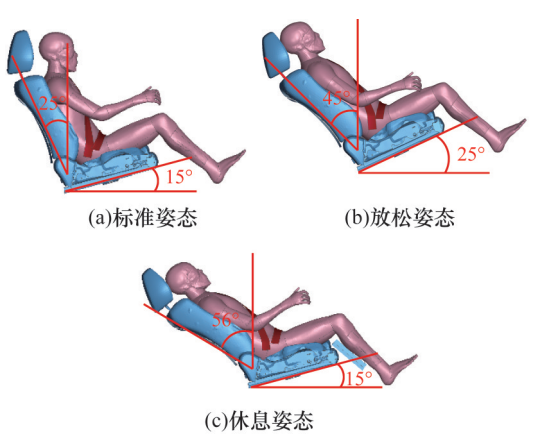


图1　Accord整车-MPDB -THUMS乘员有限元模型

Fig.1　The finite element model of Accord vehicle-MPDB -THUMS occupant

1.2　姿态定义与仿真矩阵

根据中国汽车工程研究院调研的26款市场车型零重力座椅的角度配置参数，得到零重力座椅产品的靠背角度与坐垫角度配置方案，参考FEI等[18]的研究成果，本文定义乘员的三种代表性姿态即标准姿态（靠背倾角25°，底座倾角15°）、放松姿态（靠背倾角45°，底座倾角25°）、休息姿态（靠背倾角56°，底座倾角15°），如图2所示。通过调整THUMS模型的骨盆、脊椎、肩部、膝部等关键部位的初始角度，使其整体躯干贴合对应姿态的座椅表面，并通过THUMS与座椅模型的预压模拟消除两者之间的初始间隙。



(a)标准姿态　(b)放松姿态

(c)休息姿态

图2　三种代表性乘员姿态

Fig.2　Three representative occupant postures

根据2024版C-NCAP的规定，试验车辆与MPDB台车均以50 km/h的速度进行正面50%重叠的偏置对撞。使用带有预紧器的三点式安全带，其中，安全带宽度为50 mm，厚度为1.2 mm，

卷收器限力值为4 kN，肩带D环锚点位于座椅靠背的左上方（模拟零重力座椅使用的座椅集成式安全带）。仿真接触设置中，选取THUMS的皮肤和肌肉组织、安全带、座椅等进行接触识别，建立THUMS与安全带、座椅、车辆内饰的双面接触，并对THUMS模型的头部、颈部、胸腹部进行接触设置。采用有限元划分前处理软件HyperMesh2022、求解器LS-DYNA R11.2进行整车碰撞仿真。

1.3 乘员损伤评价指标

正面碰撞事故中，乘员胸部易遭受严重损伤[19-20]，而肋骨骨折和心肺损伤是主要损伤形式。乘员损伤评价指标中，胸部3 ms合成加速度可有效评估胸部整体损伤，肋骨最大主应变能准确预测肋骨骨折风险[21]，胸部最大压缩量与胸部受压产生的损伤高度相关[22]，心肺压力可直观体现心肺损伤程度[23]。对后倾乘员而言，碰撞载荷沿脊柱轴向传导分量的增大会导致腰椎承受更大的冲击载荷，是后倾乘员腰椎易发生骨折损伤的原因。目前，腰椎损伤评价体系尚不成熟，因此本文仅通过腰椎椎体载荷指标来评估腰椎的骨折损伤风险。TUSHAK等[14]根据腰椎样本试验得出腰椎骨折损伤阈值，其中，腰椎轴向压缩力阈值为3.29 kN，弯曲力矩阈值为51 N·m。由于缺乏加载侧倾力矩的腰椎样本试验，因此无法确定侧倾力矩载荷的骨折损伤阈值。本文将轴向压缩力F_z、弯曲-伸展力矩M_y、左倾-右倾力矩M_x作为腰椎的骨折损伤评价指标。仿真中，提取椎体T12～L5的中心平面输出截面力为THUMS椎体载荷，调用*DATABASE_CROSS_SECTION_SET_ID关键字输出截面力时，需在椎体中心平面定义局部坐标系，其中，坐标系X轴指向THUMS模型背部，腰椎椎体三种载荷方向如图3所示。

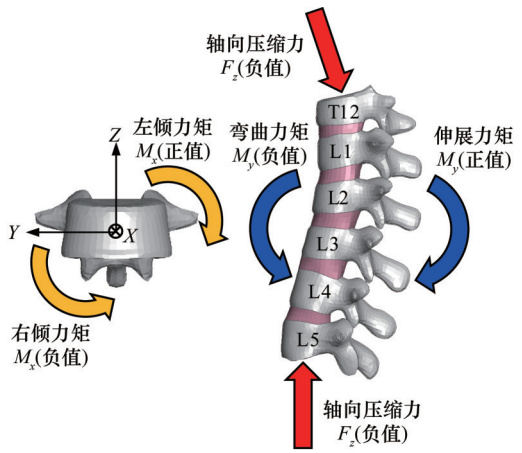


图3 腰椎椎体三种载荷方向

Fig.3 Three loading directions of lumbar vertebral

2 结果分析

2.1 运动学响应

图4所示为三种姿态乘员的运动学响应。本研究定义0 ms为碰撞初始时刻。0～80 ms内，安全带拉力较小时，由于惯性作用，乘员均保持原有姿态并向前移动；随着安全带卷收力的不断增大，腰带对骨盆的约束作用增强，乘员上躯干以骨盆为中心转动，上躯干与大腿之间的夹角不断变小。80～120 ms内，卷收器拉力达到限力值4 kN时，标准姿态乘员的胸骨与左锁骨被肩带有效约

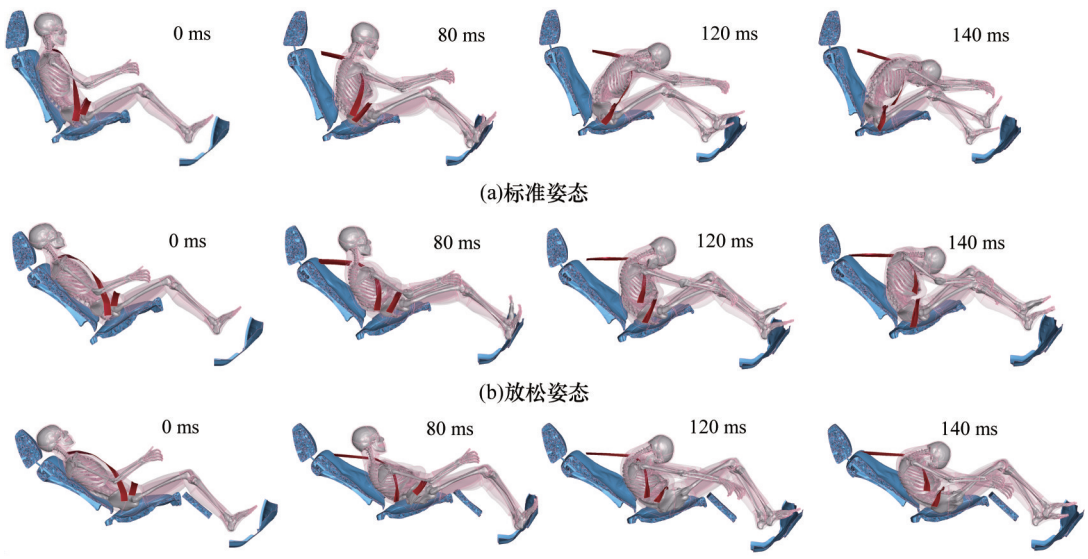


图4 乘员运动学响应

Fig.4 Occupant kinematic response

束，放松姿态乘员的肩带勒向颈部，休息姿态乘员的肩带由胸骨滑向颈部且持续压迫颈部，出现“勒脖子”现象。随着靠背倾角的增大，肩带约束效果显著下降。120 ms时，三种姿态乘员头部的前向位移最大，随后乘员进入回弹阶段。140 ms时，三种姿态乘员仍处于回弹阶段，但上躯干在肩带的作用下被拉回。

图5所示为乘员头部、T3胸椎、T9胸椎、L2腰椎、骨盆的运动轨迹。观察头部运动轨迹可知，随着靠背倾角的增大，头部的Z向位移显著减小，即乘员上躯干向正前方转动的角度减小。随着靠背倾角的增大，T3胸椎、T9胸椎、L2腰椎的Z向位移显著增大，即椎体运动趋势由向前方位移回弹，逐渐转变为沿着脊柱轴向向“下”位移后回弹。标准、放松、休息姿态下的骨盆H点相对于座椅的最大前向位移分别增大104 mm、169 mm、217 mm。

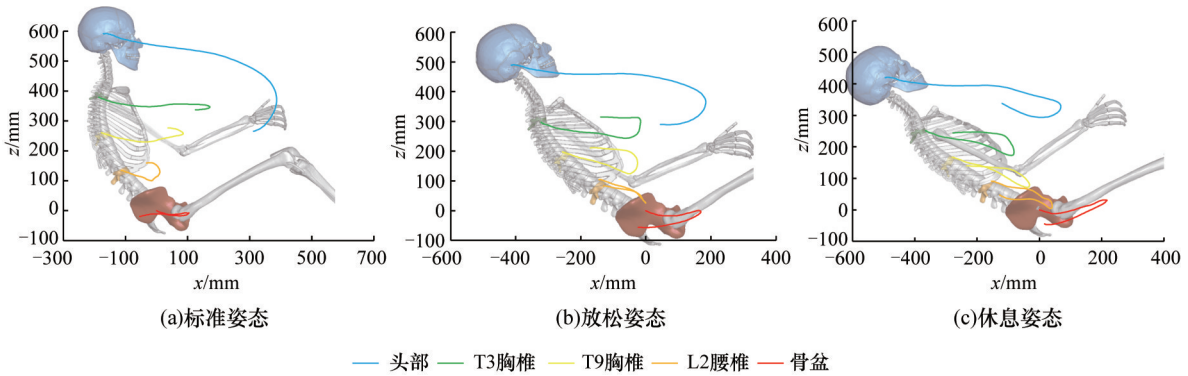


图5　乘员关键部位轨迹

Fig.5　Trajectory of key parts of the occupant

图6所示为休息姿态的乘员骨盆与腰带。本研究通过腰带下边缘是否滑过髂前上棘来判定是否发生下潜。120 ms时，休息姿态乘员的右侧髂骨前翼绕Y轴逆时针旋转达到水平状态，腰带滑过右侧骨盆的髂前上棘，发生下潜，而左侧骨盆未发生下潜。研究发现，后倾姿态乘员脚部与内饰踏板的接触不仅会限制骨盆的最大前向位移，还会显著影响骨盆绕Y轴的旋转（与下潜的发生直接相关[6]）。

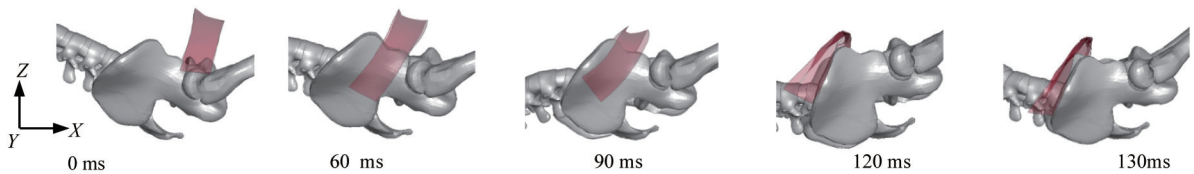


图6　休息姿态乘员骨盆与腰带相对位置

Fig.6　Relative position between the occupant´s pelvis and the seatbelt in the resting posture

2.2　腰椎生物力学响应

如图7所示，随着靠背倾角的增大，各椎体的轴向压缩力峰值增大。从标准姿态到休息姿态，各椎体的轴向压缩力平均增大0.80 kN，其中，腰椎L1对靠背倾角变化最敏感，增大1.03 kN，增幅达40.55%。标准姿态乘员的压缩力峰值为腰椎L3的2.80 kN，但未超过椎体骨折阈值3.29 kN。放松姿态乘员的压缩力峰值为腰椎L1的3.36 kN，超过阈值3.29kN，存在椎体骨折风险。休息姿态乘员的压缩力峰值为腰椎L4的3.58 kN，且椎体T12、L1、L3、L5的压缩力均超过阈值3.29 kN，故该姿态的腰椎整体存在骨折风险。

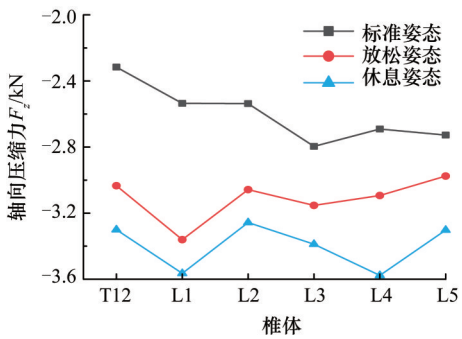


图7　椎体的轴向压缩力峰值

Fig.7　Peak axial compressive force of vertebrae

三种姿态下，乘员椎体T12-L5整体的弯曲-伸展运动学响应如图8～图10所示。标准姿态下，0～70 ms内，腰椎整体向后弯曲；70 ms后，整体以腰椎L3为中心向前旋转；腰椎L3在77 ms有最大弯曲力矩78.49 N·m；腰椎整体在130 ms有最大前向位移，随后进入回弹阶段。放松姿态下，0～90 ms内，腰椎整体以L2腰椎为中心向后弯曲；腰椎L2在83 ms有最大弯曲力矩

92.77 N·m；90 ms后，腰椎整体向前旋转；腰椎整体在130 ms有最大前向位移，随后进入回弹阶段。休息姿态下，0～90 ms内，腰椎整体向后运动，其中，T12、L1、L2、L3组成的上腰椎以L1为中心向后弯曲且腰椎L1在81 ms有最大弯曲力矩96.92 N·m，L4、L5组成的下腰椎向后伸展且腰椎L5在84 ms有最大伸展力矩39.13 N·m；90 ms后，腰椎延续着弯曲与伸展运动共存的模式向前旋转。由上述三种姿态的乘员腰椎运动学与动力学响应可知，不同姿态下，腰椎弯曲旋转中心与该姿态的最大弯曲力矩椎体存在对应关系，即腰椎整体以哪块椎体为旋转中心进行弯曲时，则该块椎体承受的弯曲力矩最大。此外，随着靠背倾角的增大，腰椎弯曲转动中心“上移”，标准、放松、休息姿态的弯曲转动中心分别为腰椎L3、L2、L1。

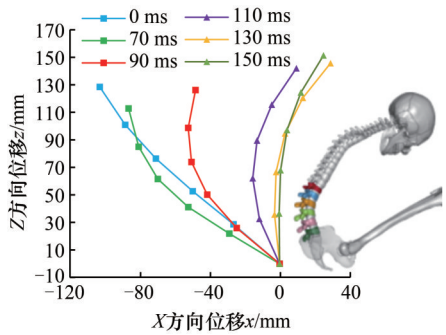


图8 标准姿态下的椎体弯曲-伸展运动学响应

Fig.8 Kinematic response of vertebrae flexion-extension in the standard posture occupant

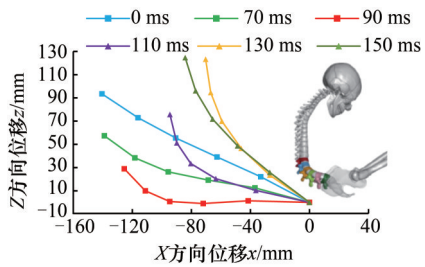


图9 放松姿态下的椎体弯曲-伸展运动学响应

Fig.9 Kinematic response of vertebrae flexion-extension in the relaxed posture occupant

图11为椎体弯曲-伸展力矩M_y的峰值图。标准姿态下，乘员腰椎L2～L5的弯曲力矩绝对值超过阈值51 N·m，存在椎体骨折风险。放松姿态下，乘员椎体T12、L1～L5的弯曲力矩绝对值均超过阈值51 N·m，存在椎体骨折风险。休息姿态下，乘员椎体T12、L1～L3的弯曲力矩绝对值超过阈值51 N·m，其中，椎体L1的弯曲力矩绝对值达到96.92 N·m，存在椎体骨折风险。靠背倾角增至56°时，休息姿态乘员的椎体L5出现了伸展力矩。

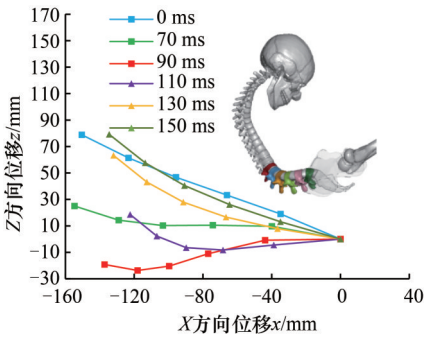


图10 休息姿态下的椎体弯曲-伸展运动学响应

Fig.10 Kinematic response of vertebrae flexion-extension in the resting posture occupant

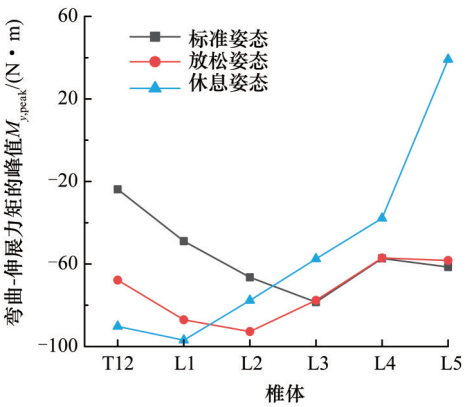


图11 椎体的弯曲-伸展力矩峰值

Fig.11 Peak flexion-extension moment My of vertebrae

三种姿态下，乘员椎体T12-L5整体的左倾-右倾运动学响应如图12～图14所示。标准姿态下，0～90 ms内，腰椎整体向左偏移，椎体T12、L1、L2承受右倾力矩，即上腰椎段右侧弯曲和左侧伸展，椎体L3、L4、L5承受左倾力矩，即下腰椎段左侧弯曲和右侧伸展；90 ms后，腰椎整体向右偏移回弹。三种姿态乘员的腰椎横向弯曲运动模式相同，均是上腰椎段承受右倾力矩，下腰椎段承受左倾力矩，即腰椎整体表现出S形侧向弯曲现象（乘员的T12椎体向左最大位移量分别为标准姿态40 mm、放松姿态59 mm、休息姿态68 mm），但放松姿态和休息姿态在110 ms后才进入向右侧位移回弹阶段。、

图15为椎体左倾-右倾力矩M_x的峰值曲线图。放松姿态下的椎体L5有最大的左倾力矩55.07 N·m，椎体左侧存在较高的骨折风险。休息姿态下的椎体T12有最大的右倾力矩绝对值53.01 N·m，椎体右侧存在较高的骨折风险。放松姿态与休息姿态的椎体M_x峰值绝对值相近，且未随靠背倾角的增大而增大，其原因是放松姿态的座椅底座倾角25°大于休息姿态的底座倾角15°，这提示采用坐垫抬高的下潜防护措施可能会增大后倾乘员腰椎的侧倾力矩。

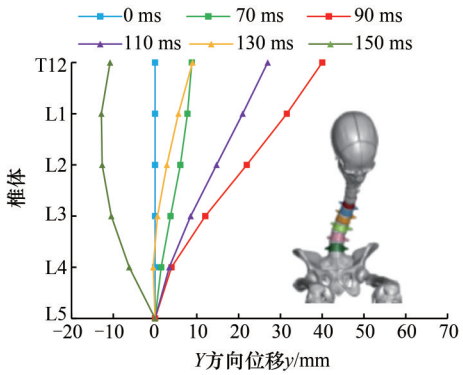


图 12　标准姿态下的椎体左倾-右倾运动学响应

Fig.12　Kinematic response of vertebrae Left tilt-Right tilt in the standard posture occupant

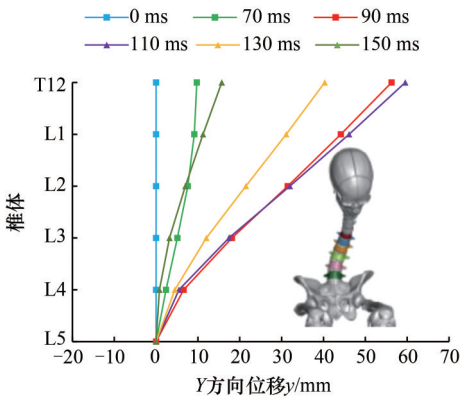


图 13　放松姿态下的椎体左倾-右倾运动学响应

Fig.13　Kinematic response of vertebrae Left tilt-Right tilt in the relaxed posture occupant

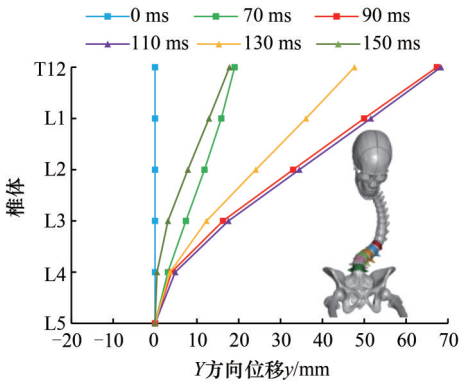


图 14　休息姿态下的椎体左倾-右倾运动学响应

Fig.14　Kinematic response of vertebrae Left tilt-Right tilt in the resting posture occupant

2.3　胸部损伤风险

图 16 是三种姿态的乘员胸部合成加速度曲线图，测量位置在胸椎 T4。0～60 ms 内，肩带拉力较小，乘员上躯干受惯性作用向前；3 条曲线差异不大。60～120 ms 内，安全带拉力逐渐增大至限力值 4 kN，肩带对乘员胸部的约束力达到最大，放松和休息姿态的乘员加速度曲线波峰较多，标准姿态的乘员加速度曲线波峰较少。乘员头部在 120 ms 的前向位移最大，上躯干受肩带拉力作用开始向靠背回弹。

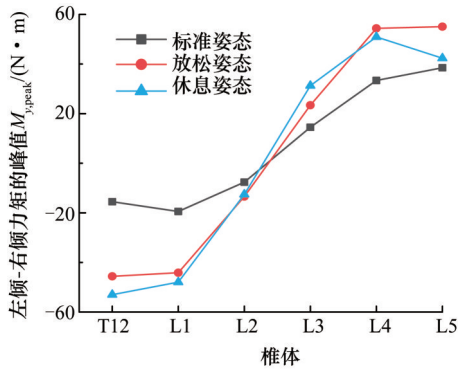


图 15　椎体的左倾-右倾力矩峰值

Fig.15　Peak Left tilt - Right tilt moment Mx of vertebrae

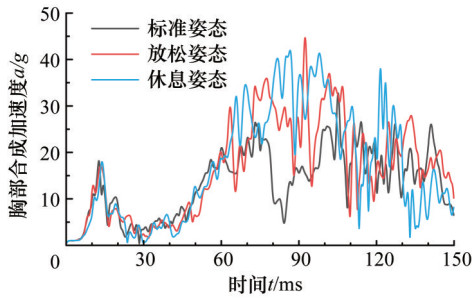


图 16　胸部合成加速度曲线

Fig.16　Chest resultant acceleration curve

由表 1 可知，随着靠背倾角的增大，乘员的胸部 3 ms 合成加速度增大，但均远小于阈值 60g；胸部最大压缩量均小于 C-NCAP 法规的高性能限值 35 mm，且随着靠背倾角的增大，胸部最大压缩量减小。这是因为在放松与休息姿态下，乘员皆遇到“勒脖子”现象，肩带在碰撞过程中持续压迫颈部而非胸部。

表 1　胸部 3ms 合成加速度与最大压缩量

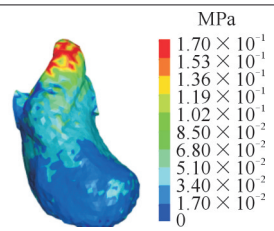
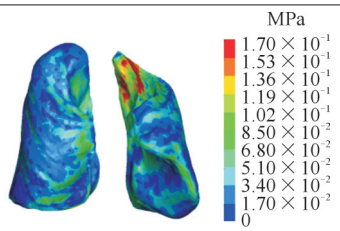
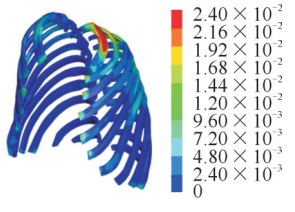
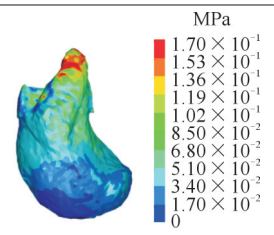
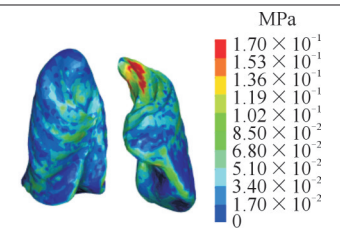
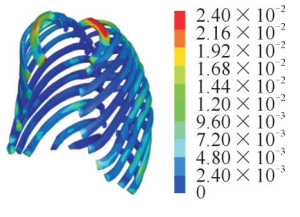
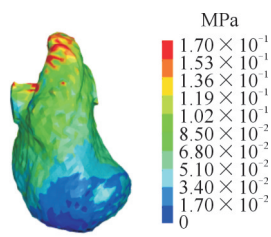
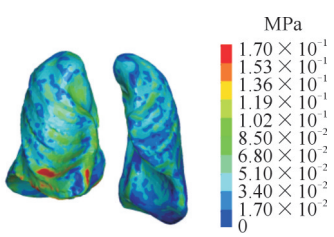
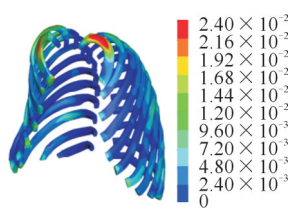
Tab.1　Chest 3ms resultant acceleration and maximum compression

	乘员姿态		
	标准	放松	休息
靠背倾角/(°)	25	45	56
胸部 3 ms 合成加速度/g	24.71	32.31	36.88
胸部最大压缩量/mm	19.56	16.19	15.41

表 2 所示为心肺器官压力及肋骨最大主应变。乘员的肋骨最大主应变均出现在与肩带接触的左侧第一肋骨处。心脏压力最大值出现在心脏上方。标准姿态、放松姿态的乘员肺部压力最大值出现在受肩带压迫的左肺上方。休息姿态的乘员由于“勒脖子”现象，肺部压力最大值出现在受肩带压迫的右肺下方。每种姿态乘员的心脏压力最大值、肺部压力最大值、肋骨最大主应变均远超对应阈值 170 kPa[23]、16 kPa[23]、2.4%[21]，乘员胸部均存在严重损伤风险。

表2 心肺压力最大值及肋骨最大主应变云图

Tab.2 Cloud diagram of heart-lung pressure and maximum principal strain of ribs

乘员姿态	心脏压力	肺部压力	肋骨最大主应变
标准	 891.70 kPa@85 ms	 704.18 kPa@95 ms	 5.26%@107 ms
放松	 765.84 kPa@143 ms	 723.38 kPa@130 ms	 5.63%@107 ms
休息	 999.35 kPa@130 ms	 1013.37 kPa@91 ms	 3.86%@118 ms
阈值	170 kPa	16 kPa	2.4%

3 讨论与分析

由表3可知，随着靠背倾角的增加，各椎体的轴向压缩力增大。从标准姿态到休息姿态，单块椎体的轴向压缩力平均增大0.80 kN，其中，腰椎L1对靠背角度变化最敏感，增大1.03 kN，增比40.55%；放松姿态乘员的腰椎L1与休息姿态乘员的椎体T12、L1、L3～L5的轴向压缩力均超过阈值3.29 kN，存在较大的骨折风险。对于弯曲-伸展力矩载荷，结合乘员的运动学响应分析可知，不同姿态下腰椎弯曲旋转中心与最大弯曲力矩椎体存在对应关系，标准、放松、休息姿态乘员的弯曲转动中心分别为腰椎L3、L2、L1，这三块椎体也是对应姿态下承受弯曲力矩最大的椎体，休息姿态乘员的腰椎L1承受的最大弯曲力矩绝对值96.92 N·m远超阈值51 N·m。此外，随着靠背倾角的增大，腰椎弯曲转动中心“上移”。标准姿态乘员的腰椎仅有弯曲运动，但随着靠背倾角的增大，休息姿态的椎体L4、L5出现伸展运动，休息姿态乘员的椎体L5有伸展力矩最大值39.13 N·m，腰椎出现弯曲与伸展运动共存的模式。MPDB偏置碰撞工况的试验车辆会以碰撞点为中心产生一定的旋转，即试验车辆会产生角加速度，乘员臀部会随坐垫向右运动，同时放松和休息两种姿态的乘员存在“勒脖子”现象，颈部被肩带强力约束，导致后倾乘员腰椎整体出现大幅

表3 腰椎椎体的力学响应参数

Tab.3 Mechanical response parameters of lumbar vertebral bodies

椎体	轴向压缩力/kN			弯曲力矩/(N·m)			伸展力矩/(N·m)			左倾力矩/(N·m)			右倾力矩/(N·m)		
	标准	放松	休息	标准	放松	休息	标准	放松	休息	标准	放松	休息	标准	放松	休息
T12	2.32	3.03	3.30	−23.81	−67.83	−90.28	/	/	/	/	/	/	−15.52	**−45.59**	**−53.01**
L1	2.54	**3.36**	3.56	−48.95	−87.04	**−96.92**	/	/	/	/	/	/	**−19.45**	−44.15	−47.94
L2	2.54	3.06	3.26	−66.43	**−92.77**	−77.69	/	/	/	/	/	/	−7.63	−13.45	−12.57
L3	**2.80**	3.15	3.39	**−78.49**	−77.65	−57.52	/	/	/	14.50	23.39	31.29	/	/	/
L4	2.69	3.09	**3.58**	−57.32	−57.07	−37.82	/	/	17.66	33.38	54.39	**50.92**	/	/	/
L5	2.73	2.98	3.30	−61.45	−58.29	−29.44	/	**6.99**	**39.13**	**38.49**	**55.07**	42.35	/	/	/

度的S形弯曲。三种姿态乘员的侧倾力矩分布规律相同，均是上腰椎段T12-L1-L2承受右倾力矩（休息姿态乘员的T12椎体有极值−53.01 N•m），而下腰椎段L3-L4-L5承受左倾力矩（放松姿态乘员的L5椎体有极值55.07 N•m）。后倾乘员腰椎损伤的已有研究（机械假人和尸体试验、腰椎样本加载试验、假人和人体有限元模型仿真试验）均重点关注腰椎在压缩-弯曲复合载荷下的骨折损伤风险。本研究发现，后倾乘员在MPDB偏置碰撞中，椎体还承受侧倾力矩载荷，即后倾乘员腰椎承受压缩、弯曲、侧倾三种载荷，三种载荷对椎体造成的损伤远大于单一载荷。因此，侧倾力矩M_x应作为核心载荷指标之一，纳入腰椎骨折概率风险预测模型及腰椎损伤评价准则，以完善后倾乘员腰椎的生物力学防护理论体系。

由表4可知，休息姿态乘员的胸部最大压缩量最小，但心肺压力最高，其原因如下：①肩带向上滑动过程中，对右肺下方产生局部高压，使肺部压力最大值出现于右肺下方；②肩带在130 ms已滑动至颈部，且自上而下对心脏产生局部高压，导致心脏在此时出现压力最大值。若后倾乘员在碰撞过程中发生“勒脖子”现象，则传统的胸部损伤评价指标胸部最大压缩量可能无法有效评估后倾乘员的胸部损伤风险。

表4　胸部损伤评价指标

Tab.4　Chest injury assessment indices

损伤参数	乘员姿态		
	标准	放松	休息
胸部3 ms合成加速度/g	24.71	32.31	**36.88**
胸部最大压缩量/mm	**19.56**	16.19	15.41
心脏压力/kPa	891.70	765.84	**999.35**
肺部压力/kPa	704.18	723.38	**1013.37**
肋骨最大主应变/%	5.26	**5.63**	3.86

4　结论

1）后倾姿态乘员脚部与内饰踏板的接触不仅会限制骨盆的最大前向位移，还会显著影响骨盆绕Y轴的旋转。该旋转与下潜的发生直接相关，即内饰踏板的接触显著影响乘员下潜的发生概率。

2）若后倾乘员在碰撞过程中发生“勒脖子”现象，那么胸部最大压缩量可能无法有效评估后倾乘员的胸部损伤风险。

3）随着靠背倾角的增大，椎体T12、L1、L2、L3、L4、L5所受轴向压缩力显著增大。椎体L1对靠背倾角变化最为敏感，从标准姿态变为休息姿态时，椎体L1的轴向压缩力增大1.03 kN，增幅达40.55%。休息姿态下的乘员腰椎整体存在骨折风险。

4）不同姿态下的腰椎弯曲旋转中心与最大弯曲力矩椎体存在对应关系。随着靠背倾角的增大，腰椎弯曲转动中心出现“上移”趋势。标准、放松、休息姿态的弯曲转动中心分别为椎体L3、L2、L1。靠背倾角增至56°时，休息姿态乘员的腰椎运动学表现出弯曲与伸展运动共存的模式。

5）MPDB偏置碰撞中，试验车辆的角加速度导致后倾乘员的腰椎整体表现出大幅度S形侧倾运动。腰椎椎体承受压缩、弯曲、侧倾三种载荷，因此侧倾力矩应纳入腰椎损伤评价准则。此外，采用坐垫抬高的下潜防护措施可能增大后倾乘员腰椎的侧倾力矩。

本研究存在如下局限：①仅使用THUMS AM50人体有限元模型研究后倾姿态的乘员损伤，未考虑体型、性别和年龄等对乘员运动学和损伤的影响；②未考虑人体肌肉主动力在碰撞期间的应激响应；③腰椎侧倾力矩缺乏公认的损伤阈值，故本文无法评价侧倾力矩造成的椎体侧面骨折风险。后续将会针对上述问题进行深入研究。

参考文献：

[1] ÖSTLING M, ANNIKA L. Occupant Activities and Sitting Positions in Automated Vehicles in China and Sweden [C]//Proceedings of the ESV Conference. Eindhoven, 2019: 19-0083.

[2] SOFIA J, KATARINA B, ANNIKA L. Seating Positions and Activities in Highly Automated Cars-a Qualitative Study of Future Automated Driving Scenarios [C]//Proceedings of the IRCOBI. Antwerp, 2017: 17-11.

[3] DISSANAIKE S, KAUFMAN R, MACK C D, et al. The Effect of Reclined Seats on Mortality in Motor Vehicle Collisions [J]. Journal of Trauma - Injury, Infection and Critical Care, 2008, 64(3): 614-619.

[4] SCHAEFER L C, JUNGE M, VÖRÖS I, et al. Odds Ratios for Reclined Seating Positions in Real-world Crashes [J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 161: 106357.

[5] RICHARDSON R, DONLON J P, JAYATHIRTHA M, et al. Kinematic and Injury Response of Reclined PMHS in Frontal Impacts [J]. SAE Technical Paper Series, 2021, 1: 2020-22-0004.

[6] RICHARDSON R, JAYATHIRTHA M, CHASTAIN K, et al. Thoracolumbar Spine Kinematics and Injuries in Frontal Impacts with Reclined Occupants [J]. Traffic Injury Prevention, 2020, 21(S1): S66-S71.

[7] BAUDRIT P, URIOT J, RICHARD O, et al. Investigation of Potential Injury Patterns and Occupant Kinematics inFrontal Impact with PMHS in Reclined Postures [J]. Stapp Car Crash Journal, 2023, 66: 2022-22-0001.

[8] SHIN J, DONLON J P, RICHARDSON R, et al. Comparison of Thoracolumbar Spine Kinematics and Injuries in Reclined Frontal Impact Sled Tests between Mid-size Adult Female and Male PMHS [J]. Accident Analysis & Prevention, 2023, 193: 107334.

[9] RAWSKA K, GEPNER B, MOREAU D, et al. Submarining Sensitivity across Varied Seat Configurations in Autonomous Driving System Environment[J]. Traffic Injury Prevention, 2020, 21(S1): S1-S6.
[10] RAWSKA K, GEPNER B, KERRIGAN J R. Effect of Various Restraint Configurations on Submarining Occurrence across Varied Seat Configurations in Autonomous Driving System Environment[J]. Traffic Injury Prevention, 2021, 22(sS1): S128-S133.
[11] MROZ K, ÖSTLING M, RICHARDSON R, et al. Effect of Seat and Seat Belt Caracteristics on the Lumbar Spine and Pelvis Loading of the SAFER Human Body Model in Rclined Postures [C] //Proceedings of the IRCOBI. Munich, 2020: 20-58.
[12] 武和全，边楚虹，胡林，等. 汽车自动驾驶过程中不同姿态乘员在追尾碰撞中的损伤研究[J]. 中国机械工程，2023, 34(13): 1628-1637.
WU Hequan, BIAN Chuhong, HU Lin, et al. Research on Injury of Occupants with Different Postures in Rear End Impacts during Automatic Driving[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(13): 1628-1637.
[13] 沈文轩，戴睿，谭普元，等. 后倾乘员碰撞损伤与防护研究综述[J]. 汽车工程，2024, 46(12): 2241-2256.
SHEN Wenxuan, DAI Rui, TAN Puyuan, et al. A Review of Reclined Occupant Crash Injuries and Impact Protection[J]. Automotive Engineering, 2024, 46(12): 2241-2256.
[14] TUSHAK S K, PAUL DONLON J, GEPNER B D, et al. Failure Tolerance of the Human Lumbar Spine in Dynamic Combined Compression and Flexion Loading[J]. Journal of Biomechanics, 2022, 135: 111051.
[15] TUSHAK S K, GEPNER B D, FORMAN J L, et al. Human Lumbar Spine Injury Risk in Dynamic Combined Compression and Flexion Loading[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2023, 51(6): 1216-1225.
[16] Mass Reduction for Light-Duty Vehicles for Model Years 2017-2025 Final Report[R/OL]. (2012-08)[2025-07-01]. https://static.nhtsa.gov/nhtsa/downloads/CAFE/2017-25_Final/811666.pdf.
[17] TOYOTA Motor Corporation. Total Human Model for Safety (THUMS)[EB/OL]. [2025-07-01]. https://www.toyota.co.jp/thums/.
[18] FEI J, LIU Y, WANG P F, et al. Comparison of Responses Between Human Body Model and Anthropomorphic Test Device Model in Reclined Postures [C] //Proceedings of the IRCOBI. Stockholm, 2024: 24-97.
[19] 韩勇，李明旺，张悦苅，等. MPDB工况下驾驶员姿态对损伤风险的研究[J]. 汽车工程，2024, 46(5): 874-881.
HAN Yong, LI Mingwang, ZHANG Yuecong, et al. Study of Driver Posture on Injury Risk under MPDB Conditions[J]. Automotive Engineering, 2024, 46(5): 874-881.
[20] 韩勇，张悦苅，李明旺，等. AEB工况下驾驶员姿态对损伤风险的影响[J]. 汽车工程，2024, 46(10): 1920-1927.
HAN Yong, ZHANG Yuecong, LI Mingwang, et al. Effect of Driver Posture on Injury Risk under AEB Conditions [J]. Automotive Engineering, 2024, 46(10): 1920-1927.
[21] KEMPER A R, McNALLY C, PULLINS C A, et al. The Biomechanics of Human Ribs: Material and Structural Properties from Dynamic Tension and Bending Tests[J]. SAE Technical Paper Series, 2007, 1: 2007-22-0011.
[22] 王鹏，潘迪，叶美婷，等. 正面碰撞自动紧急制动系统作用下六岁儿童乘员姿态对损伤风险的影响[J]. 中国机械工程，2025, 36(3): 483-492.
WANG Peng, PAN Di, YE Meiting, et al. Effects of Occupant Posture on Injury Risk in Frontal Crash AEB for Six-year-old Children[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(3): 483-492.
[23] RUAN J, EL-JAWAHRI R, CHAI L, et al. Prediction and Analysis of Human Thoracic Impact Responses and Injuries in Cadaver Impacts using a Full Human Body Finite Element Model[J]. Stapp Car Crash Journal, 2003, 47: 299-321.

（编辑 张 洋）

作者简介：肖宗瀚，男，2000年生，硕士研究生。研究方向为乘员主被动防护技术。E-mail：2322051071@stu.xmut.edu.cn。
韩 勇*（通信作者），男，1984年生，教授、博士研究生导师。研究方向为车辆智能安全、道路弱势群体安全、碰撞生物力学等。E-mail：Yonghan@xmut.edu.cn。

本文引用格式：
肖宗瀚，潘迪，黄志山，等. 后倾乘员在MPDB碰撞中的腰椎生物力学响应与胸部损伤风险[J]. 中国机械工程，2026，37(7)：1664-1672.
XIAO Zonghan, PAN Di, HUANG Zhishan, et al. Lumbar Spine Biomechanical Responses and Chest Injury Risks for Reclined Occupants under MPDB Impact[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(7): 1664-1672.

（上接第1663页）

[19] 陈航. 面向飞行的半转扇翼结构设计与研究[D]. 马鞍山：安徽工业大学，2023.
CHEN Hang. Design and Research of Half-rotating Fan-wing Structure for Flight[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2023.
[20] 杜思亮. 扇翼空气动力特性数值模拟与试验研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2017.
DU Siliang. Numerical Simulation and Experimental Study on Aerodynamic Characteristics of Fan Wing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

（编辑 张 洋）

作者简介：王孝义*（通信作者），男，1970年生，博士，教授。研究方向为新型机构、仿生机械、数字化设计与制造。发表论文100余篇。E-mail：wangxy@ahut.edu.cn。

本文引用格式：
王孝义，王康，伏昭东，等. 半转扇翼双翼布局对气动特性的影响[J]. 中国机械工程，2026，37(7)：1660-1668.
WANG Xiaoyi, WANG Kang, FU Zhaodong, et al. Effect of Half-rotating Fan Wing Biplane Configuration on Aerodynamic Characteristics[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(7): 1660-1668.