

文章编号: 1004-7220(2023)04-0703-07

座椅椅背倾角对飞行员颈部损伤的影响

刘景龙^{1#}, 赵彦鹏^{2#}, 卜伟平², 王丽珍^{1*}, 柳松杨^{2*}, 樊瑜波^{1,3}

(1. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院, 生物力学与力生物学教育部重点实验室, 北京市生物医学工程高精尖创新中心, 北京 100083; 2. 空军特色医学中心, 北京 100142; 3. 北京航空航天大学 医学科学与工程学院, 北京 100083)

摘要:目的 探究不同椅背倾角对飞行员颈部损伤的影响。方法 基于头颈部多刚体动力学模型,对两种典型飞行工况下(急转弯和稳定盘旋)椅背倾角 17°和 22°进行仿真计算,得到颈部肌肉力及椎间力,并采用颈部损伤的 NIC 准则、 N_{ij} 准则和简明损伤分类方法对颈部损伤进行评估与预测。结果 同一飞行工况下,椅背倾角 17°时,颈部前屈,斜方肌和头夹肌受到拉伸。椅背倾角 22°时,颈部后伸,集总舌肌受到拉伸,且椅背倾角 17°时斜方肌受到的拉力最大。同一颈椎节段,椅背倾角 17°时的轴向力高于椅背倾角 22°时,而 22°时的后伸力矩大于 17°时的前屈力矩。所有飞行工况下的力和力矩均未超过颈椎节段的损伤评估值,颈部脊髓也不会发生损伤。急转弯工况下,椅背倾角为 22°时 C7~T1 节段 N_{ij} 在所有工况中最大,达到航空领域建议的临界值,此时颈部发生中度、重度伤的概率分别为 3.93%、2.63%。结论 本研究结果可为评估椅背倾角对飞行员颈部的损伤情况提供支撑。

关键词: 飞行员; 椅背倾角; 头颈部动力学模型; 颈部损伤分析; 动力学仿真

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.04.010

Effects of the Seat Back Angle on Neck Injury of Pilots

LIU Jinglong^{1#}, ZHAO Yanpeng^{2#}, BU Weiping², WANG Lizhen^{1*}, LIU Songyang^{2*}, FAN Yubo^{1,3}

(1. Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, Beijing Advanced Innovation Center for Biomedical Engineering, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China; 2. Air Force Medical Center of PLA, Beijing 100142, China; 3. School of Medical Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Objective To study the effect of seat back angle (SBA) on neck injury of pilots. **Methods** Based on head-neck multi-body dynamic model, dynamic simulations were conducted on 17° and 22° SBA under two typical flight conditions (sharp turning and stable hovering). The maximum forces of neck muscle and time-varying curves of axial force, bending moment were obtained. Neck injury was evaluated and predicted based on neck injury criterion (NIC), N_{ij} criterion and abbreviated injury scale (AIS). **Results** Under the same flight condition, the neck was under flexion at 17° SBA, and the trapezius and splenius capitis were stretched. While the neck was under extension at 22° SBA, and the lingualis was stretched. The muscle force of the trapezius at 17° SBA was the maximum. For the same segment, the axial force at 17° SBA was higher than that at 22° SBA, while the extension moment at 22° SBA was larger than the flexion moment at 17° SBA. The axial force and moment under

收稿日期: 2022-08-15; 修回日期: 2022-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(11822201), 空军军医大学飞行人员效能提升计划项目(2019ZTA04)

通信作者: 王丽珍, 教授, E-mail: lizhenwang@buaa.edu.cn; 柳松杨, 高级工程师, E-mail: lsybiam@sina.com

#为共同第一作者, *为共同通信作者

all flight conditions did not exceed the defined injury assessment reference values, and no damage to the cervical spinal cord would occur. The N_y of C7-T1 segment at 22° SBA under sharp turning condition was the maximum under all simulated conditions, reaching the critical value in aviation field, and the probability of moderated injury and serious injury for the neck was 3.93% and 2.63%, respectively. **Conclusions** The results in this study will provide support for evaluating the effect of SBA on neck injury of pilots.

Key words: pilots; seat back angle; head-neck dynamic model; neck injury analysis; dynamic simulation

飞行员处在复杂的飞行环境中,颈部容易出现疼痛甚至损伤^[1]。调查显示,51%的飞行员出现过颈部疼痛症状^[2]。丹麦空军飞行员在飞行中或飞行后出现颈部疼痛的比例甚至高达97%^[3],而中国飞行员颈部疼痛的发生率也达33.7%^[4]。颈部疼痛的病因有颈部肌肉拉伤、椎间盘突出、韧带撕裂等^[1,5]。而飞行座椅倾角、飞行载荷以及头盔的佩戴是引起颈部疼痛和损伤的重要原因^[6-8]。当飞行员颈部出现疼痛或损伤时,会寻求康复甚至手术治疗,严重影响飞行训练^[7,9]。

针对飞行员的颈部疼痛及损伤,国内外开展了大量研究,包括流行病学调查、实验研究和数值仿真研究。Pei等^[10]研究座椅椅背倾角对飞机乘客颈部疲劳的影响,发现椅背倾角越大,乘客主观评价越好。Zhang等^[11]实验发现,相比于垂直座椅,20°椅背倾角会导致头颈部后伸,颈部屈肌产生较大的拉伸。王家涛等^[12]建立头颈部有限元模型,对飞行员加载离心机不同训练模式下颈椎的损伤进行预测。王文军等^[13]建立简化的人体模型,发现紧急弹射情况下,相比于15°椅背倾角,30°椅背倾角可降低飞行员背部受力。Grebval等^[14]使用开源的人体模型,分析自动驾驶过程中椅背倾角对乘客的影响。刘春杰等^[15]建立人体头颈部有限元模型,发现紧急弹射过程中,大的椅背倾角更容易造成颈部损伤。

综上所述,目前针对座椅椅背倾角对人体损伤影响的研究多集中在飞机乘客或者汽车乘员方面,而针对飞行员损伤的研究主要关注弹射冲击性过载的影响。急转弯及稳定盘旋工况是战斗机空战时载荷最大的工况,是日常训练及空战中飞行员最容易发生损伤的状态。然而,这种情况与飞机乘客、汽车乘员和弹射时飞行员受到的载荷有很大不同。现阶段,飞行员的椅背倾角一般为17°或22°,约有70%的飞行员在飞行过程中发生

由于飞行载荷导致的损伤^[4]。而关于急转弯及稳定盘旋工况下椅背倾角对飞行员颈部损伤影响的研究,目前还鲜有报道。本文采用数值仿真方法,分析两种飞行工况下椅背倾角对飞行员颈部损伤的影响。

1 模型建立与验证

1.1 模型建立

基于本课题组先前研究建立的头颈部多刚体模型^[16-17],对1名头颈部无畸形和病变的成年男性进行CT扫描,将CT图像导入Mimics 10.0中,通过阈值分割等功能将骨性结构分离,在Geomagic Studio 12.0中对模型进行去噪、平滑,建立具有光滑表面的头颈部骨性结构的几何模型。随后,基于多刚体动力学软件MSC. ADAMS 2017定义椎体间的相互作用及建立肌肉,得到头颈部多刚体动力学模型。模型中,坐标原点位于第1胸椎(T1)的几何中心,定义前后向为X轴,左右向为Y轴,根据右手法则定义竖直方向为Z轴(见图1)。

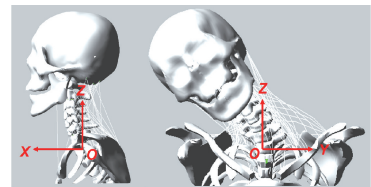


图1 头颈部多刚体模型及坐标系定义

Fig. 1 Head-neck multi-body model and definition of coordinate

模型中将头骨、椎体、肩骨及胸骨等骨性结构设成刚体,参考De Jager等^[18]的研究设置头骨和椎体的质量特性。胸骨与肩骨仅提供颈部肌肉的附着点,对于椎体之间的力学作用,构建包含椎间盘、椎间韧带和椎体关节共同作用的集总参数关节,通过力-力矩与位移-速度之间的关系定义关节特性,不考虑椎间盘、椎间韧带和颈部肌肉的质量^[16-19]。

基于颈部肌肉的解剖位置,建立包括头夹肌、斜方肌等颈部肌肉,由于肌肉只能承受拉力,采用具备拉伸特性的“绳索”单元表示肌肉作用。为了表示肌肉的弯曲效应,在肌肉附着的起止点之间建立类似滑轮的分割点,通过分割点的肌肉力大小相等而方向发生变化,避免了肌肉之间的“黏附”。使用Hill肌肉模型表示肌肉的收缩作用^[20]。

1.2 模型验证

对模型进行沿脊柱方向 8 G 和 10 G (1 G =

9.8 m/s²) 轴向冲击^[21] 及 15 G 前向冲击^[22] 的验证。结果表明,模型沿脊柱方向在 8 G 和 10 G 轴向冲击下加速度响应与实验数据趋势一致,在 0.1 s 前略滞后于实验数据。模型在 15 G 前向冲击沿 X 和 Z 向的加速度与实验结果也基本吻合,Z 轴加速度在 0.15 s 之后略低于实验数据。模型枕骨大孔处的前后剪切力在 0.1 s 附近与实验结果有较大差异,其他部分基本吻合;而模型枕骨大孔处的力矩响应与实验结果还有较大差距(见图 2)。

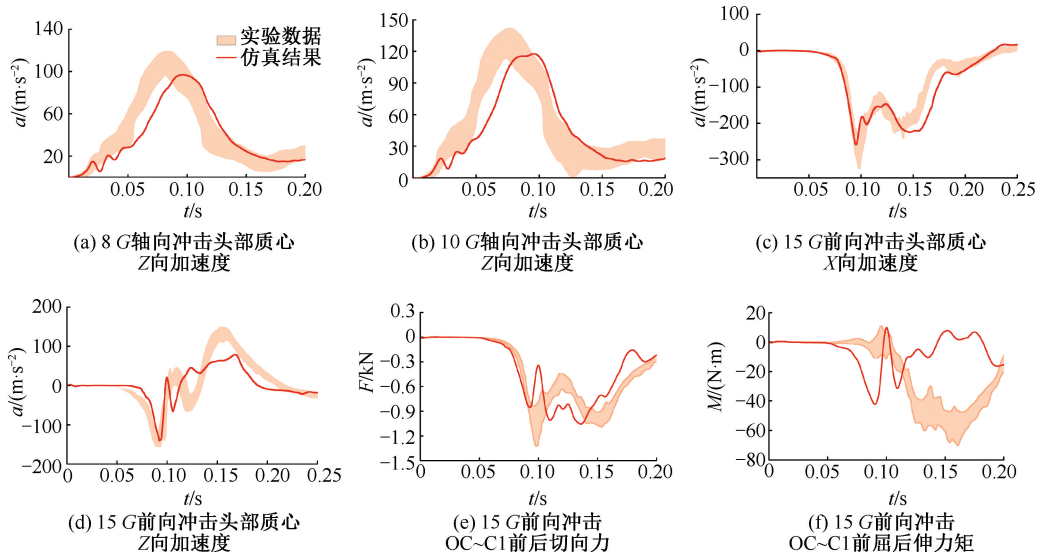


图 2 模型验证结果对比^[17]

Fig. 2 Comparison of model validation results^[17] (a) Acceleration on head CG (center of gravity) in Z direction under 8 G vertical impact, (b) Acceleration on head CG in Z direction under 10 G vertical impact, (c) Acceleration on head CG in X direction under 15 G frontal impact, (d) Acceleration on head CG in Z direction under 15 G frontal impact, (e) Shear force on OC-C1 segment under 15 G frontal impact, (f) Flexion-extension moment on OC-C1 segment under 15 G frontal impact

2 模型计算与结果讨论

2.1 飞行载荷曲线

采用急转弯和稳定盘旋两种工况的加速度曲线作为模型输入,提取飞行实验中飞行员座椅加速度曲线,通过计算飞行员人椅背带系统模型得到飞行员胸椎 T1 处的加速度曲线(见图 3),将加速度曲线作为边界条件加载到头颈部模型的 T1 胸椎处开展动力学计算。

2.2 颈部肌肉力分析

结果显示,在两种飞行工况下,椅背倾角为 17° 时,头夹肌和斜方肌均受到拉伸,而集总舌肌几乎

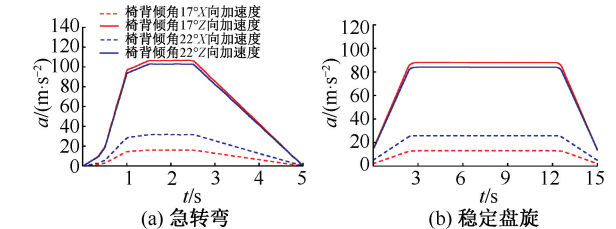


图 3 不同工况下两种椅背倾角下飞行加速度曲线

Fig. 3 Acceleration curves at two seat angles under different working condition (a) Under sharp turning condition, (b) Under stable hovering condition

不受力;而在椅背倾角为 22° 时,集总舌肌受到拉伸,而头夹肌和斜方肌几乎不受力。在急转弯工况

下,椅背倾角为 22° 时,集总舌肌最大肌肉力为 16.6 N,而椅背倾角 17° 对应的斜方肌肌肉力为 34.2 N;稳定盘旋工况下,椅背倾角为 22° 时,集总舌肌最大肌肉力为 19 N,而椅背倾角 17° 时对应的斜方肌最大肌肉力为 25.2 N(见图4)。

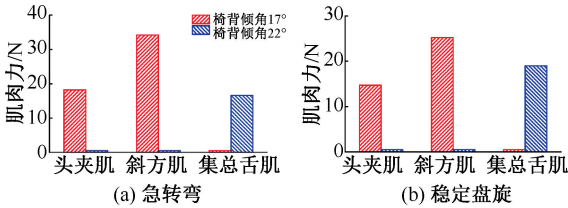


图4 不同飞行工况下两种椅背倾角下颈部最大肌肉力

Fig. 4 Maximum muscle force at two seat angles under different flight conditions (a) Under sharp turning condition, (b) Under stable hovering condition

2.3 椎间受力分析

图5显示了枕骨大孔与第1颈椎(OC~C1)及第7颈椎与第1胸椎(C7~T1)之间的力和力矩曲线。本文规定轴向压缩力和前屈力矩为正,轴向拉伸力和后伸力矩为负。

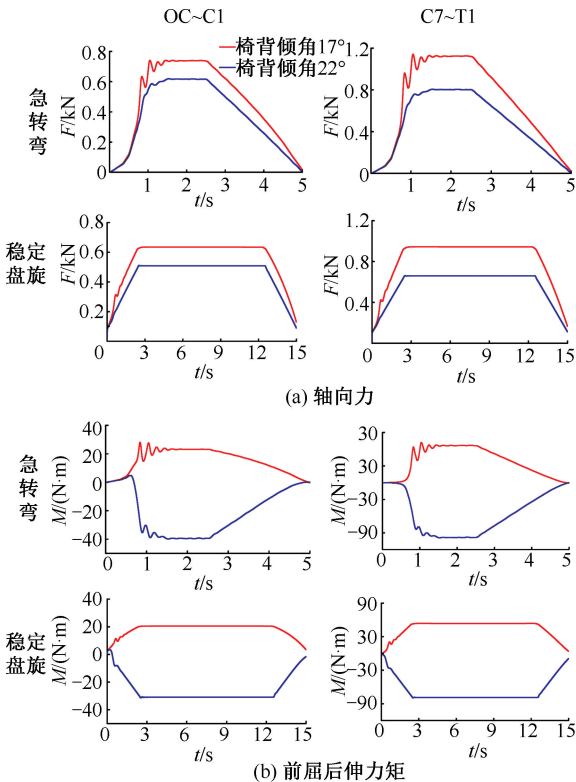


图5 不同飞行工况下 OC-C1 及 C7-T1 节段椎间受力曲线

Fig. 5 Force curves of OC-C1 and C7-T1 segment under different flight conditions (a) Axial force, (b) Flexion-extension moment

结果表明,急转弯工况下,两节段的轴向压缩力在 17° 和 22° 倾角下具有相似的变化趋势,在 1 s 后,椅背倾角 22° 时的轴向作用力均小于倾角为 17° 的情况。椅背倾角为 17° 时力矩为正,两节段受到前屈力矩的作用,而椅背倾角为 22° 时两节段力矩为负,受到后伸的力矩作用。且在同一节段下,1.0~2.5 s,椅背倾角 22° 时的后伸力矩幅值高于倾角 17° 时的幅值。

稳定盘旋工况下,两节段的轴向压力与轴向输入曲线也具有相似的变化趋势,对于同一节段, 22° 倾角时的轴向压力小于 17° 时的轴向压力。 22° 倾角时两节段也受到后伸力矩,而 17° 倾角时两节段为前屈力矩,且在 3~12 s, 22° 倾角对应的力矩幅值均大于同一节段 17° 倾角的力矩幅值。

表1总结了 OC~C1 及 C7~T1 节段在不同椅背倾角下的最大轴向力及力矩,以及各自节段发生显著损伤的评估参考值^[23]。结果表明,急转弯工况下,椅背倾角 17° 时,C7~T1 节段的最大轴向压力为 1 141.6 N,小于轴向压力的参考值 4 kN;椅背倾角 22° 时,C7~T1 节段的最大后伸力矩为 $-98.9 \text{ N}\cdot\text{m}$,也小于节段损伤的参考值 $-192 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

表1 OC-C1 及 C7-T1 节段最大力与力矩及损伤评估参考值

Tab. 1 Maximum axial force, force moment and injury assessment reference values for OC-C1 and C7-T1 segments

飞行 工况	$\theta/$ ($^\circ$)	F_z/N		$M_y/(\text{N}\cdot\text{m})$	
		OC-C1	C7-T1	OC-C1	C7-T1
急转弯	17	740.7/	1 141.6/	28/-0.4	72/-1.0
	22	-0.4	-0.5		
稳定盘旋	17	619.2/0	806.3/0	4.8/-39.9	0/-98.9
	22	635.3/0	944.0/0	20.6/0	53.8/-0.4
损伤评估 参考值		4 000/	4 000/	190/	380/
		-4 170	-4 170	-96	-192

注: θ 椅背倾角。

2.4 损伤风险判定

颈部损伤准则(neck injury criterion, NIC)是用来评价颈部前后向运动对颈部脊髓损伤影响的准则^[24],计算公式如下:

$$\text{NIC} = 0.2a_{\text{rel}} + v_{\text{rel}}^2 \quad (1)$$

式中: a_{rel} 为头部质心相对胸椎 T1 处的前后向加速度; v_{rel} 为头部质心相对胸椎 T1 处的前后速度。结果表明,急转弯工况下, 17° 、 22° 椅背倾角的最大

NIC 分别为 1.2、1.1 m^2/s^2 ; 稳定盘旋工况下, 17° 、 22° 椅背倾角的最大 NIC 分别为 0.2、0.4 m^2/s^2 。急转弯工况 17° 椅背倾角的 NIC 在所有情况中最大, 但该值远小于脊髓发生损伤的阈值 15 m^2/s^2 。

颈部损伤的 N_{ij} 准则是用来综合评估颈部的轴向力和前屈后伸力矩对颈部损伤影响的准则, 是通过力/力矩的临界值将相对应的力/力矩归一化评价颈部损伤^[25]。计算公式为:

$$N_{ij} = \left| \frac{F_z}{F_{\text{int}}} \right| + \left| \frac{M_y}{M_{\text{int}}} \right| \quad (2)$$

式中: F_z 和 M_y 分别为轴向力和前屈后伸力矩; F_{int} 和 M_{int} 是相应节段耐受限度。本研究中对于 OC~C1 及 C7~T1 节段, 压缩的耐受限度均为 6.20 kN, 拉伸均为 6.78 kN; OC~C1 节段前屈力矩的耐受限度为 305 $\text{N}\cdot\text{m}$, 后伸为 133 $\text{N}\cdot\text{m}$; C7~T1 节段前屈力矩的耐受限度为 610 $\text{N}\cdot\text{m}$, 后伸为 266 $\text{N}\cdot\text{m}$ ^[23]。 N_{ij} 越大, 损伤风险越高。

由 N_{ij} 随时间的变化曲线可见, 急转弯工况下, OC~C1 节段在两种椅背倾角下的 N_{ij} 具有相似的变化趋势, 在 1~3 s 处于较为恒定的值, 且椅背倾角 22° 情况的 N_{ij} 大于椅背倾角 17° 的情况。对于同一椅背倾角, C7-T1 节段的 N_{ij} 曲线在 1~3 s 时间段内均高于 OC~C1 节段。稳定盘旋工况下, 两节段在两种椅背倾角下的 N_{ij} 均具有相似的变化趋势; 同一节段下, 在 3~12 s, 椅背倾角为 22° 的 N_{ij} 均高于椅背倾角 17° 的情况 (见图 6)。

简明损伤分类 (abbreviated injury scale, AIS) 根据最大 N_{ij} 计算得到相应等级损伤发生的概率 P ^[26]。AIS 损伤分类有 0、1、2、3、4、5 共计 6 个等级, 分别表示无损伤 (no injury)、轻微伤 (minor)、中度伤 (moderate)、较重伤 (serious)、严重伤 (severe)、危重伤 (critical)。对飞行员颈部超过第 2 和第 3 等级的损伤概率计算公式如下^[27]:

$$P = \frac{1}{1 + e^{5.2545 - 4.1 \times N_{ij}}}, \quad \text{AIS} \geq 2 \quad (3)$$

$$P = \frac{1}{1 + e^{5.31423 - 3.3922 \times N_{ij}}}, \quad \text{AIS} \geq 3 \quad (4)$$

表 2 显示了最大 N_{ij} 及对应的损伤概率。可以看出, 急转弯工况下, 椅背倾角为 22° 时 C7~T1 节段的最大 $N_{ij}=0.5$, 在所有工况中最大, 发生中度伤

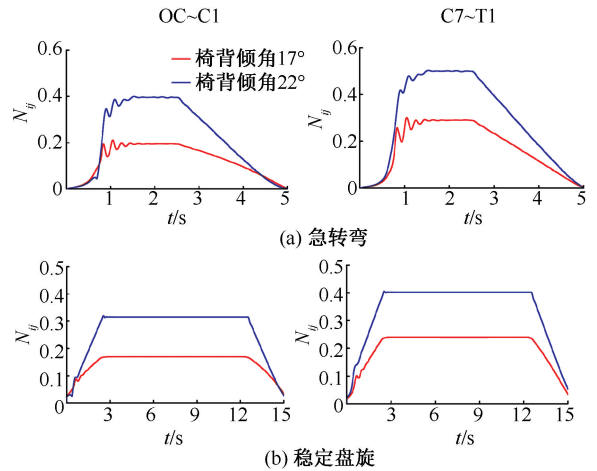


图 6 不同飞行工况下 OC~C1 及 C7~T1 节段 N_{ij} 随时间变化曲线

Fig. 6 N_{ij} time curves for OC-C1 and C7-T1 segments under different flight conditions (a) Under sharp turning condition, (b) Under stable hovering condition

的概率为 3.93%, 重度伤的概率为 2.63%。其他工况下的最大 N_{ij} 均小于 0.5, 发生中度伤的概率均小于急转弯工况下椅背倾角 22° 时 C7~T1 节段的损伤概率。

表 2 最大 N_{ij} 及损伤概率

Tab. 2 Maximum N_{ij} and probability of injury

指标	节段	急转弯		稳定盘旋	
		17°	22°	17°	22°
最大 N_{ij}	OC~C1	0.21	0.40	0.17	0.32
	C7~T1	0.30	0.50	0.24	0.41
$P(\text{AIS} \geq 2)/\%$	OC~C1	1.22	2.62	1.04	1.90
	C7~T1	1.77	3.93	1.38	2.68
$P(\text{AIS} \geq 3)/\%$	OC~C1	0.99	1.87	0.87	1.43
	C7~T1	1.35	2.63	1.10	1.91

3 讨论

本文研究了急转弯及稳定盘旋两种典型飞行工况下椅背倾角对飞行员颈部损伤的影响并对模型进行加速度和力与力矩的验证。结果显示, 在前向冲击验证时, Z 方向的加速度在 0.15 s 后与实验结果相比发生了偏移。Panzer 等^[20] 的模型验证中也出现了类似的偏离情况, 推测与实验中志愿者的肌肉收缩有关, 模型验证中尽管考虑了肌肉的收缩作用, 但是无法完全模拟颈部肌肉真实的情况。力和力矩的验证是数值仿真模型是否适用于相应计

算场景的重要表现,然而模型中力和力矩响应受到运动学及模型质量特性等多重影响。本研究中和力矩的验证表明,模型在前后力矩的动力学特性方面需要进一步提高,这可能影响了模型对力矩预测的准确性。

本文发现,两种飞行工况下,椅背倾角 22° 时集总舌肌最大肌肉力均小于 17° 时斜方肌最大肌肉力。该结果表明,对于不同飞行工况,椅背倾角 17° 的情况对颈部肌肉有更大的影响,可能增加后侧肌肉的拉伤风险。两种座椅倾角下,头颈部的响应发生了较大的差异,推测是由于加速度作用下头部在前向和轴向不同的附加力及力矩导致。本研究中模型响应与文献[14]的结果相符。

研究显示,枕骨大孔处由于损伤容限较低容易受到损伤,而下颈椎由于过大的作用力容易受到损伤^[23,28]。且由于输入载荷的幅值特点及其处于人体矢状面(XZ 平面)内的特点,本研究中椎体之间主要受到矢状面内沿脊柱方向的轴向压缩力与前屈后伸力矩的作用,故提取了 $OC\sim C1$ 及 $C7\sim T1$ 之间的轴向力和前屈后伸力矩进行分析。本文发现,在两种飞行工况下,对于同一颈椎节段, 22° 倾角时的轴向力小于 17° 时的轴向力,表明座椅椅背倾角的增加会降低脊柱节段之间沿轴向的作用力。该结果与文献[13,29]中的结果一致。由表1可知,急转弯及稳定盘旋工况下两种椅背倾角对应的最大力与力矩都在损伤参考值范围之内,说明在本文工况下颈部节段均不会发生显著的损伤。

作为评价颈部前后向运动对颈部脊髓损伤影响的准则,NIC常用于汽车后碰撞的挥鞭伤评价。本文发现,急转弯及稳定盘旋工况下两种椅背倾角对应最大NIC远小于脊髓发生损伤的阈值($15\text{ m}^2/\text{s}^2$),表明脊髓不会发生损伤。本文认为,NIC通常用来评价前后向的影响,而本研究的计算工况中 Z 向加速度远大于 X 向,这可能是NIC较小的原因。

为了保证航空领域飞行员的安全,一般 $N_{ij} \leq 0.5$ ^[27]。本文发现,同一椅背倾角下 $C7\sim T1$ 节段的 N_{ij} 曲线在 $1\sim 3\text{ s}$ 时间段内均高于 $OC\sim C1$ 节段,推测是下颈椎节段载荷较大所致。针对稳定盘旋工况下,同一颈椎节段椅背倾角为 22° 的 N_{ij} 在 $3\sim 12\text{ s}$ 均高于椅背倾角 17° 。结合 $OC\sim C1$ 及 $C7\sim T1$ 节段

的受力,对同一飞行工况,椅背倾角为 17° 的轴向力均高于 22° 。而椅背倾角为 22° 时产生后伸力矩,椅背倾角为 17° 产生前屈力矩,且后伸力矩大于前屈力矩。且对于同一节段,后伸力矩的耐受限度还不到前屈力矩耐受限度的50%,表明椅背倾角为 22° 时较大的后伸力矩及后伸力矩较低的耐受限度是导致其 N_{ij} 大于椅背倾角为 17° 时的原因。本文还发现,急转弯工况下,椅背倾角为 22° 时 $C7\sim T1$ 节段的最大 N_{ij} 达到了航空领域要求的临界值(0.5),且发生中度伤和重度伤的概率最高,其他情况最大 N_{ij} 均小于0.5,满足航空领域安全。综上所述,在急转弯及稳定盘旋工况飞行中,应考虑椅背倾角对飞行员颈部损伤的影响,避免颈部的过度前屈或者后伸,防止颈部出现损伤。然而,受限于模型的建立,本文在仿真计算中仅考虑肌肉的被动作用,使模型无法完全反映颈部肌肉的响应,模型中也无法单独反映颈部韧带和椎间盘的响应。后续可以建立包含各组织的有限元模型,对颈部响应开展进一步的分析。

4 结论

本文基于人体头颈部多刚体动力学模型,使用颈部损伤的NIC和 N_{ij} 准则,以及AIS损伤概率研究不同椅背倾角对飞行员颈部损伤情况的影响,得到以下结论:

- (1) 急转弯工况倾角 17° 时对颈部肌肉有较大影响,会增加颈部后侧肌肉被拉伤的风险。
- (2) 在所有的计算工况下,颈椎节段均不会发生显著损伤,也不会发生脊髓损伤。
- (3) 急转弯工况下, $C7\sim T1$ 节段在椅背倾角为 22° 时的中度伤概率最大为3.93%,重度伤的概率为2.63%。其他情况下,相应等级的损伤风险均小于急转弯工况下椅背倾角为 22° 时的情况,发生中度及重度的损伤概率均较小。

参考文献:

- [1] 王丽珍,樊瑜波. 过载性损伤与防护生物力学[J]. 力学进展, 2020, 50: 202004.
- [2] HONKANEN T, SOVELIUS R, MÄNTYSAARI M, *et al.* +Gz exposure and spinal injury-induced flight duty limitations [J]. *Aerosp Med Hum Perform*, 2018, 89(6): 552-556.

- [3] LANGE B, TORP-SVENDSEN J, TOFT P. Neck pain among fighter pilots after the introduction of the JHMCS helmet and NVG in their environment [J]. *Aviat Space Environ Med*, 2011, 82(5): 559-563.
- [4] 柳松杨, 丛红, 王鹤, 等. 军机飞行员的颈部损伤研究 [J]. *医用生物力学*, 2010, 25(4): 262-265.
LIU SY, CONG H, WANG H, *et al.* Study on neck injuries in military pilots [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(4): 262-265.
- [5] KESKIMOLO T, PERNU J, KARPPINEN J, *et al.* Degenerative cervical spine changes among early career fighter pilots: A 5-year follow-up [J]. *BMJ Mil Health*, 2021, doi: 10.1136/bmjilitary-2021-001848.
- [6] HARRISON MF, FORDE KA, ALBERT WJ, *et al.* Posture and helmet load influences on neck muscle activation [J]. *Aerosp Med Hum Perform*, 2016, 87(1): 48-53.
- [7] RICHES A, SPRATFORD W, WITCHALLS J, *et al.* A systematic review and meta-analysis about the prevalence of neck pain in fast jet pilots [J]. *Aerosp Med Hum Perform*, 2019, 90(10): 882-890.
- [8] SOVELIUS R, MANTYLA M, HUHTALA H, *et al.* Head movements and neck muscle activity during air combat maneuvering [J]. *Aerosp Med Hum Perform*, 2020, 91(1): 26-31.
- [9] HUANG HW, LIU JL, WANG LZ, *et al.* A critical review on the biomechanical study of cervical interbody fusion cage [J]. *Medicine Nov Technol Device*, 2021, 11: 100070.
- [10] PEI HN, YU SH, DING M, *et al.* Aircraft passenger comfort based on muscle activation and perceived discomfort during long flights [J]. *Aerosp Med Hum Perform*, 2020, 91(5): 416-421.
- [11] ZHANG HZ, MENG L, GONG Y, *et al.* The influence of backrest angles on the passenger neck comfort during sleep in the economy class air seat without head support [J]. *Int J Ind Ergon*, 2021, 84: 103074.
- [12] 王家涛, 包佳仪, 周前祥, 等. 飞行员机动飞行过程中颈椎动力学响应仿真及损伤预测 [J]. *医用生物力学*, 2022, 37(2): 262-267.
WANG JT, BAO JY, ZHOU QX, *et al.* Dynamic response simulation and damage prediction of pilot cervical vertebra during maneuver flight [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(2): 262-267.
- [13] 王文军, 余隋怀, 初建杰, 等. 不同倾角弹射座椅对人体过载荷冲击力学分析 [J]. *机械设计*, 2014, 31(10): 65-68.
- [14] GREBONVAL C, TROSSEILLE X, PETIT P, *et al.* Effects of seat pan and pelvis angles on the occupant response in a reclined position during a frontal crash [J]. *PLoS One*, 2021, 16(9): e0257292.
- [15] 刘春杰. 高 G 载荷下飞行员紧急弹射时颈部动力学响应与损伤研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2022.
- [16] WANG YW, WANG LZ, LIU SY, *et al.* A two-step procedure for coupling development and usage of a pair of human neck models [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Eng*, 2018, 21(5): 413-426.
- [17] 王丽珍, 刘景龙, 赵彦鹏, 等. 飞行过程中头盔对飞行员颈部损伤的影响 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2022, 48(9): 1818-1826.
- [18] DE JAGER MKJ. Mathematical head-neck models for acceleration impacts [D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 1996.
- [19] HORST M. Human head neck response in frontal, lateral and rear end impact loading [D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2002.
- [20] PANZER MB, FICE JB, CRONIN DS. Cervical spine response in frontal crash [J]. *Med Eng Phys*, 2011, 33(9): 1147-1159.
- [21] JACOB BP, JEFFREY TS, JESSICA AW, *et al.* Development and evaluation of a finite element model of the THOR for occupant protecting of spaceflight crewmembers [J]. *Accid Anal Prev*, 2015, 82: 244-256.
- [22] THUNNISSEN J, WISMANS J, EWING C, *et al.* Human volunteer head-neck response in frontal flexion: A new analysis [J]. *Stapp Car Crash J*, 1995, 39: 3065-3086.
- [23] WHITE NA, MORENO DP, GAYZIK FS, *et al.* Cross-sectional neck response of a total human body FE model during simulated frontal and side automobile impacts [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Eng*, 2015, 18(3): 293-315.
- [24] BOSTRÖM O, SVENSSON MY, ALDMAN B, *et al.* A new neck injury criterion candidate-based on injury findings in the cervical spinal ganglia after experimental neck extension trauma [C] // *Proceedings of International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impact*. Dublin: [s. n.], 1996: 123-136.
- [25] EPPINGER R, SUN E, BANDAK F, *et al.* Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems-II [S]. Washington D. C. : NHTSA, 1999.
- [26] KING AI. The biomechanics of impact injury [M]. Cham: Springer, 2017.
- [27] PARR JC, MILLER ME, PELLETTIERE JA, *et al.* Neck injury criteria formulation and injury risk curves for the ejection environment: A pilot study [J]. *Aviat Space Environ Med*, 2013, 84(12): 1240-1248.
- [28] 柯鹏, 诸斌, 柳松杨, 等. 拦阻着舰过程中不同百分位人体颈部损伤风险的差异对比 [J]. *医用生物力学*, 2018, 33(5): 383-389.
KE P, ZHU B, LIU S Y, *et al.* Differences of neck injury risks for different dummies during arrested landing [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(5): 383-389.
- [29] OTT KA, DEMETROPOULOS CK, LUONGO ME, *et al.* Evaluation of the whole body spine response to sub-injurious vertical loading [J]. *Ann Biomed Eng*, 2021, 49(11): 3099-3117.