

Sitting Comfort Evaluation of the Cockpit Based on Biomechanics

Yunzhi Kong, Youchao Sun

College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu
Email: sunyc@nuaa.edu.cn

Received: Feb. 10th, 2017; accepted: Feb. 25th, 2017; published: Feb. 28th, 2017

Abstract

In this paper, the sitting comfort evaluation of the cockpit is studied based on biomechanics. Firstly, we establish "pilot seat" model in the biomechanical simulation software Anybody according to the physiological data of pilot and choose two main indexes: the muscle activity and joint torque. We change the seat height and the back angle respectively and the simulation data are obtained after the treatment of double variable 3-D surface chart. We analyze the influence of seat height and back angle changes by the major muscle activity and joint torque of the pilot. The mean value, variance and the square of the muscle activity are selected to evaluate the sitting comfort, providing the guidance for the overall layout of the cockpit and the geometric parameters design for the seat.

Keywords

Ergonomics, Sitting Comfort, Biomechanics, Evaluation Method

基于生物力学的驾驶舱坐姿舒适性评价

孔云志, 孙有朝

南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京
Email: sunyc@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2017年2月10日; 录用日期: 2017年2月25日; 发布日期: 2017年2月28日

摘要

本文从生物力学角度对飞机驾驶舱坐姿舒适性的评价进行了研究。首先根据飞行员的生理数据进行人体建模, 在生物力学仿真软件Anybody中建立“飞行员-座椅”耦合模型, 选取肌肉活动、关节扭矩两个评价指标, 分别改变座椅高度和椅背倾角, 提取仿真数据进行插值处理后得到双变量三维曲面图, 从而

分析座椅高度和椅背倾角对飞行员主要肌肉活动和关节扭矩的影响。选取肌肉活动的均值、方差和差值平方和这三个参数对坐姿舒适性进行评价, 为驾驶舱各设备的总体布局和座椅的几何参数设计提供指导。

关键词

人机工效, 坐姿舒适性, 生物力学, 评价方法

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

飞机驾驶舱是飞行员执行飞行任务的核心部位, 是与飞机进行信息交互的主要场所[1]。驾驶舱为实现安全飞行提供了外部信息支持, 帮助飞行员高效、舒适的完成飞机操纵任务[2]。坐姿是飞行员执行飞行任务的基本姿态, 良好的坐姿舒适性可以提高飞行员的操作效率, 是驾驶舱舒适性研究的重要内容。飞行员在长时间的操纵飞机过程中, 很容易因为坐姿不当造成疲劳或对身体的损坏。

目前对于坐姿舒适性的研究主要集中在两个方向: 一是基于仿真软件进行数值模拟, 该方法简单易操作, 仿真周期短, 不易受环境影响; 二是基于实验进行主观评价, 即选取专业从业人员或行业专家, 对实验方案进行真实体验打分, 该方法主观性较大, 且对实验人员的专业知识要求较高。来自德国的 Nishimatsu T, Hayakawa H [3]等人以测量人与座位之间压力的方法得出了座垫与舒适性粗略的正负相关关系。来自荷兰的 Wibawa A D [4]教授运用仿真软件研究了人在正常行进状态下的肌肉活性, 并通过肌肉信号测试实验, 验证了其仿真结果的正确性。来自浙江大学的孙守迁, 柴春雷[5]研究了基于驾驶员舒适性的驾驶姿势预报方法, 采用模糊理论描述驾驶员的舒适感受, 建立了基于模糊 SVM 的舒适评价关系模型。来自天津大学的高见[6]使用该软件研究了自行车骑行过程中下肢的生物力学性能参数的变化, 得到了主要肌肉的响应面图。本文使用人体生物力学软件 Anybody 进行建模, 以飞行员的人体尺寸为依据, 选取生物力学中典型评价指标, 对驾驶舱坐姿舒适性进行评价, 指导座椅的几何参数设计和驾驶舱各设备的总体布局。

2. 生物力学模型建立

2.1. 人体生物力学软件 Anybody 介绍

目前, 越来越多的人机工效学研究采用人体生物力学仿真分析的手段进行分析, 建立“人-机”耦合系统模型, 模拟人机交互行为来研究其过程中的相关生物力学规律。

人体生物力学仿真软件 Anybody 使用 AnyScript 语言进行编程, 主要可以实现人体的肌肉与骨骼的逆向动力学分析, 输出的实验数据有骨骼受力, 肌肉活性与肌肉受力, 关节受力与关节扭矩等关键生物力学参数, 这些数据可为进行生物力学分析研究提供良好的输入[7]。本文主要的建模过程如图 1 所示。

2.2. 人体模型的建立

本文选取中国男性飞行员人体尺寸库中(GJB4856 中国男性飞行员人体尺寸)歼击机飞行员第 50 百分位的人体数据建模, 身高 1700 mm, 体重 68 kg, 其他各肢段尺寸参数见表 1。

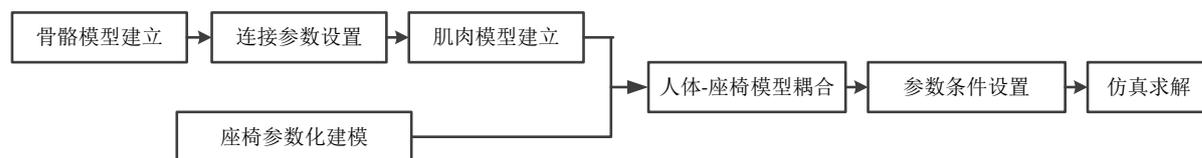


Figure 1. Modeling flow chart

图 1. 建模流程图

Table 1. Body size data of fighter pilot of the 50th percentile

表 1. 歼击机飞行员第 50 百分位人体各肢段尺寸数据

部位	尺寸/mm	部位	尺寸/mm	部位	尺寸/mm
肩高	1385	腰宽	279	坐姿膝高	502
腋窝高	1260	大腿长	492	臀围	933
腰高	1031	小腿长	363	大腿周长	554
坐高	924	上臂长	314	膝部周长	365
头长	187	前臂长	237	小腿周长	490
头宽	158	肘部周长	291	踝部周长	219
颈周长	368	前臂周长	265	踝高	120
肩宽	389	胸厚	229	脚宽	98

根据解剖学知识可知[8], 当人体产生运动时, 关节将骨骼进行间接链接, 保证相对位置变化的顺利进行。本文研究的关节形式主要分为两类: 1) 固定型, 此类关节自由度小, 轴向固定不变; 2) 被动型, 在轴向可以转动。在对飞行员的坐姿舒适性进行研究时, 主要涉及的关节有髋关节和膝关节, 参数设置情况如表 2 所示。

根据上述原理, 建立完整飞行员人体骨骼模型, 如图 2 所示。

骨骼肌依附于骨干存在人体体内, 其重量大约占据人体体重的五分之二。在运动过程中, 骨骼肌受到中枢神经的支配, 骨骼的肌收缩表示正在发力状态。在 Anybody 软件建模过程中, 主要对骨骼肌分为三大类进行定义。1) 普通型, 该类骨骼肌普遍分布在人体体内, 假设肌肉强度恒定; 2) 峰值型, 该类肌肉为发展成熟的三元的骨骼肌, 可以计算骨骼肌的受力、最大肌肉活性等许多其它特性。在进行生物力学数据提取时常分析该类肌肉的受力、伸长压缩量和肌肉活性; 3) 线型, 该类肌肉主要存在片段式肌肉组织, 长度较小。

在生物力学仿真软件 Anybody 建模分析中, 通常选取最大肌肉活性来研究骨骼肌的受力情况。最大肌肉活性是峰值型肌肉的性能参数, 在本文的研究中也采集了该项数据, 下面对该类型肌肉的工作原理进行阐述:

图 3 是峰值类骨骼肌的工作原理图, 该类型的骨骼肌包含以下三个组成部分: 1) 收缩元(CE), 代表肌肉纤维的活动性能; 2) 串联弹性元(T), 代表肌腱的弹性; 3) 并联弹性元(PE), 代表肌纤维的被动刚度。

骨骼肌可将两块及两块以上的骨骼进行连结。当骨骼肌进行收缩时, 由其连接的骨骼将会产生靠近的趋势, 由此产生了运动。在对骨骼肌进行关键点定义时, 通常把靠近四肢内侧的点当作肌肉的起始点, 靠近外侧的点当作是肌肉的终止点。所以在肌肉建模环节中, 将肌肉直接附着于人体骨骼模型之上, 完成完整的人体建模工作, 如图 4。

Table 2. Stiffness and damping settings of joints of lower limbs
表 2. 下肢各关节的刚度与阻尼设置表

关节	方向	类型	参数设置			
			刚度/(N/mm)	阻尼/(N·s/mm)	关节活动角度上限/°	关节活动角度下限/°
髋关节	矢状面	Passive	17.152	1.752	60	130
	横截面	Fixed	-			
	冠状面	Passive	17.152	1.752	60	60
膝关节	矢状面	Passive	17.152	1.752	150	40
	横截面	Fixed	-			
	冠状面	Passive				



Figure 2. Pilot skeleton model
图 2. 飞行员人体骨骼模型

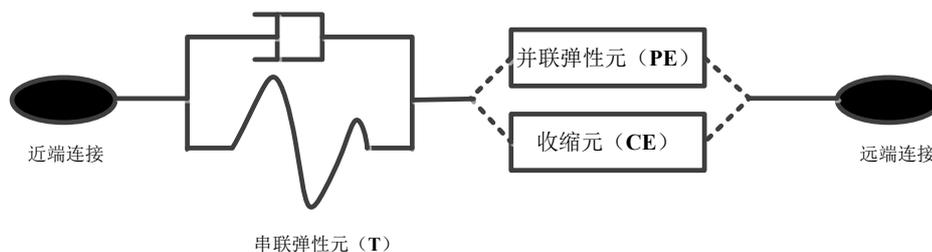


Figure 3. Muscle working principle diagram
图 3. 肌肉工作原理图



Figure 4. Complete pilot model
图 4. 完整飞行员人体模型

2.3. 飞行员-座椅系统耦合

驾驶舱的座椅的设计很大程度上决定了飞行员的坐姿, 本文参照歼击机座椅基本尺寸进行建模。因 Anybody 软件的造型功能有所欠缺, 故将座椅建模进行简化。在座椅建模过程中发现, 座椅与水平线的 5° 夹角会导致模型自由度冗余, 且导致驱动器也无法调整, 导致仿真过程无法进行, 故略去此倾角。具体座椅尺寸参数如表 3 所示。

飞行员人体模型与座椅模型的主要接触位置, 即飞行员与椅背和座垫设为刚性连接, 其它部位设为转动副耦合连接。飞行员-座椅耦合模型如下图 5 所示。

3. 仿真实验设计及结果分析

3.1. 评价指标选择

本文选用生物力学典型参数肌肉活动和关节扭矩作为舒适性的评价指标, 保证从人体本质生理反应分析座椅几何参数对舒适性的影响, 具体定义如下:

1) 肌肉活动。表示当前的肌肉力与最大肌肉力的比值[9]。肌肉活动 A_0 是评价肌肉活跃程度的较多评价因素之一, 本文选取该指标可以消除因为个体差异而带来的影响。

$$A_0 = \frac{F}{\text{strength}} \quad (1)$$

其中, F 为瞬时肌肉力, strength 为肌肉出力的最大值。

2) 关节扭矩。表示关节在运动平面内(或环转运动)所产生扭矩的平方和的算术平方根[10]。对于难以划分肌群的部位来说, 关节扭矩是主要用来评价生物力学负荷的指标。

在使用 Anybody 仿真软件建模过程中, 为了保证背部的约束, 添加了背部与座椅靠背的约束点, 此约束点按照背阔肌及竖脊肌两块肌群的位置分布, 各自约束点的反力可视为肌肉受力。臀部同样采取此种建模方法, 提取到的臀大肌与臀中肌的肌肉力发现肌肉内力的数值很小, 因此使用应力点替代肌肉力点, 分析效果更优。由此获得的飞行员保持坐姿时肌肉力受力图如图 6 所示。

由饼图可知, 飞行员坐姿状态下主要有竖脊肌、背阔肌、股二头肌、臀大肌、臀中肌这五块肌肉主要承担受力任务。所以本文主要选择这五块肌肉的肌肉活动情况进行分析, 涉及的各项评价指标参数如表 4 所示。

3.2. 实验方案设计

驾驶舱座椅与飞行员主要进行接触的是椅背和座垫两个部分, 这两个支点的相对位置决定了座椅的大致几何构型, 也直接影响着飞行员的坐姿, 所以本文基于上文建立的飞行员-座椅耦合模型, 分析飞行员在不同座椅参数情况下的生物力学评价指标的变化, 从而研究座椅参数对坐姿舒适性的影响。本仿真实验以座椅高度和椅背倾斜角为变量, 共进行 66 组仿真实验, 具体变量取值参见表 5。

3.3. 仿真结果分析

以飞行员第 50 百分位的人体数据建模, 按照上述实验方案在 Anybody 软件中进行共 60 次仿真实验。每次仿真实验提取评价所需的生物力学评价指标参数数据, 考虑到人体结构的对称性, 本文采集的肢体数据都只考虑右侧。利用 Matlab 软件对数据进行插值处理后, 从肌肉活动和关节扭矩两个方面对飞行员坐姿舒适性进行分析。

1) 对肌肉活动

从图 7 中可以看出, 随着座椅高度的增高, 背部合力以及背部的肌群都没有太明显的变化, 但是臀

Table 3. Main dimension parameter of the seat
表 3. 座椅主要尺寸参数表

参数名称	座高	座宽	座深	椅背倾角	头枕高度
初始值	350 mm	440 mm	380 mm	90°	100 mm

Table 4. Biomechanical evaluation parameters
表 4. 生物力学评价指标参数

评价指标	变量名	物理含义
肌肉活动	$A_{erector}$	竖脊肌平均肌肉活动
	A_{lati}	背阔肌平均肌肉活动
	A_{glmax}	臀大肌平均肌肉活动
	A_{glmid}	臀中肌平均肌肉活动
关节扭矩	F	背部所有肌肉合力点
	T_K	髋关节扭矩
	T_X	膝关节扭矩

Table 5. Simulation experiment variables
表 5. 仿真实验变量

变量名称	变量范围	步长
座高/mm	340~540	40
椅背倾角/°	90~110	2



Figure 5. Pilot-seat coupling model
图 5. 飞行员-座椅耦合模型

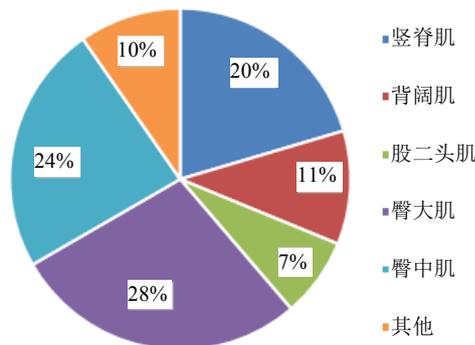


Figure 6. The muscle force distribution in the sitting position
图 6. 飞行员坐姿状态下肌肉受力分布图

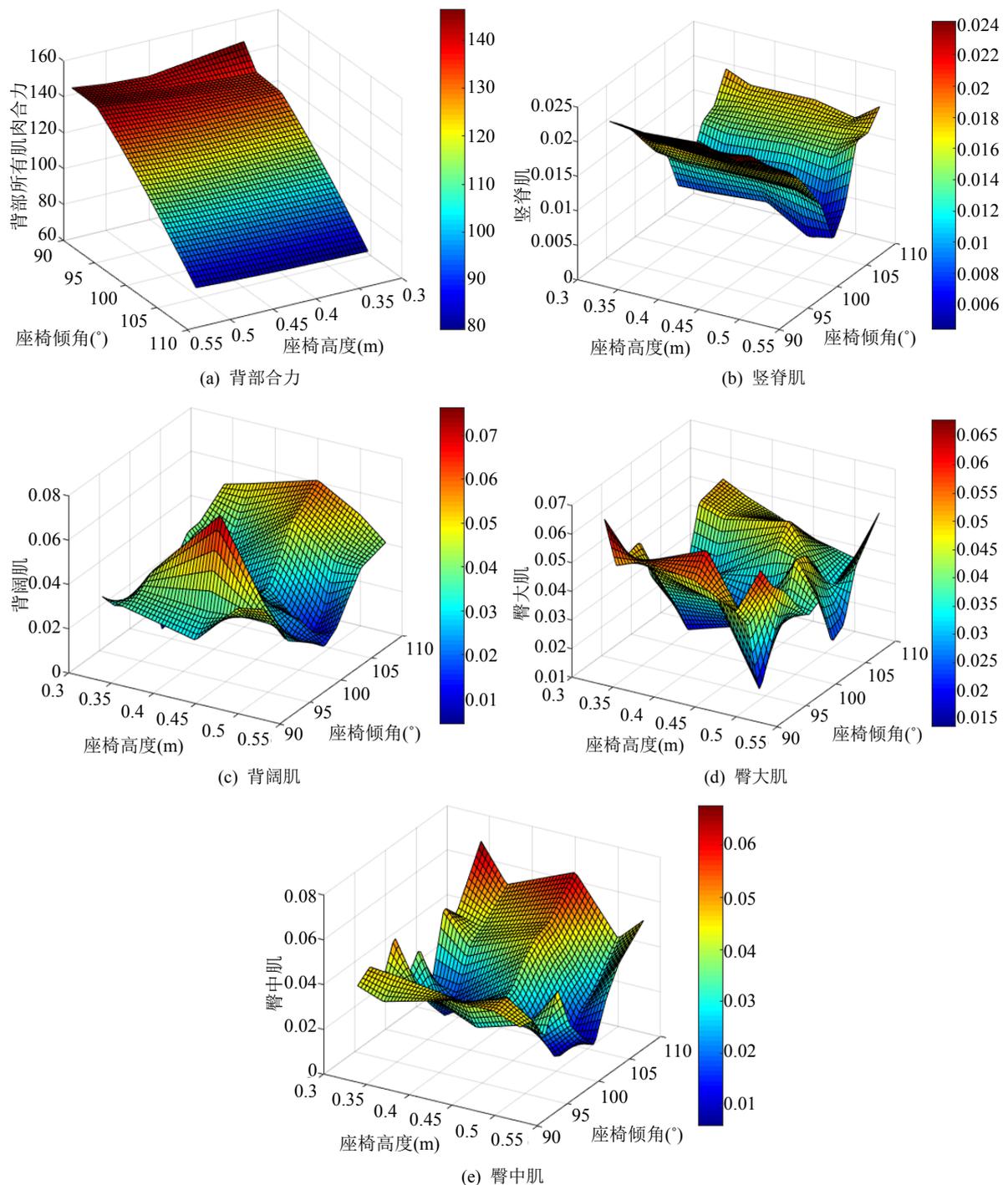


Figure 7. The response chart of main muscles when the seat height and the back angle change
图 7. 主要肌肉受力响应面随座高、椅背倾角的变化图

部的臀大肌和臀中肌的变化比较剧烈，但是在 0.45 m 至 0.50 m 的高度范围取得谷值。

随着座椅倾角的增大，飞行员的重心后移，所以背部的肌群的受力增大，但是倾角的增大也带来背部的受力面积增加，所以存在最佳倾角，使飞行员的姿态处于最舒适的位置。根据各肌肉活动的变化情况来看，在 102° 的倾角位置出现谷值，即肌肉活动角度可认为最为舒适性的位置。

2) 关节扭矩

从图 8 可以看出, 座椅高度对髋关节和膝关节的三个方向都有影响。随着座椅高度的增加, 膝关节的角度变大, 膝关节在 X 和 Z 方向存在最佳高度, 在 Y 方向处于单调增加的趋势, 所以膝关节在 0.45 m 左右取得最佳舒适性。髋关节在座椅高度增大过程中, 变化比较复杂, 三个方向的扭矩没有呈现统一的趋势。由于 Z 方向还受到座椅座深和座宽的影响, 在本文的研究中主要分析 X, Y 方向的扭矩变化, X 方向基本成单调增的趋势, Y 方向同样在 0.45 m 至 0.50 m 处接近扭矩零值, 取得最佳舒适性。综上可得, 座椅高度对关节扭矩总的呈现出先减后增的趋势, 所以在中间位置取值最为合适。

随着椅背倾角的增加, 髋关节扭矩在各方面呈现统一的增大趋势, 所以椅背倾角的增大会带来髋关节不舒适度的加剧。但随着椅背倾角的增加, 膝关节的扭矩在 X 和 Z 方向都有所减小, Y 方向的增大量也不悬殊, 所以椅背倾角的增大对膝关节的舒适性起到了改善作用。

4. 坐姿舒适性评价

根据上文的研究, 本节选取肌肉活动作为评价坐姿舒适性的主要依据, 重点选择竖脊肌、背阔肌、臀大肌、臀中肌和股二头肌这几块对坐姿舒适性影响敏感的肌肉。采用 1 至 9 标度形式, 1 代表同样重要, 9 则代表非常重要。构建判断矩阵, 通过最大特征值 λ_{\max} 求出一致性比例 CR 对矩阵确定的指标权重合理性进行检验。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

其中 $RI = 0.5189, N = 3; RI = 0.8638, N = 4$ 。若 $CR < 0.1$, 则判断矩阵的一致性是可以接受的, 可将计算结果作为指标权重[11]。

构建准则层判断矩阵, 如表 6 所示, 经计算, 判断矩阵的一致性比例 $CR = 0.0945 < 0.1$, 因此判断矩阵合理。

最后一层为方案层, 本层的主要目的是为达到最高层目标而提供具体的解决方案和策略。本文选取肌肉活动的平均值、方差和差值平方和对各方案的坐姿舒适性进行评价。根据各个参数性质, 构建方案层判断矩阵, 如表 7 所示, 判断矩阵的一致性比例 $CR = 0.0625 < 0.1$, 因此判断矩阵合理。

由上可求得各因素对坐姿舒适性影响程度的权重如表 8 所示。

则坐姿舒适性评价公式为:

$$\text{sitting comfort} = \sum_{i=1}^n (x_i \omega_{i1} + y_i \omega_{i2} + z_i \omega_{i3}) \quad (4)$$

其中 x_i, y_i, z_i 分别代表第 i 块肌肉活动的均值、方差和差值平方和这三个参数。 $\omega_{i1}, \omega_{i2}, \omega_{i3}$ 则分别代表第 i 块肌肉活动的均值、方差和差值平方和所占的权重。

根据以上对主要受力肌肉活动、关节扭矩随着座椅高度和椅背倾角变化情况的分析, 飞行员在座椅高度 0.45 m 处, 椅背倾角 102° 时取得坐姿最佳舒适值。仿真分析结果与国军标中推荐的座椅高度和椅背倾角参数十分接近, 仿真结果真实, 该评价方法有效。

5. 结论

本文研究了飞机驾驶舱的坐姿舒适性评价方法。首先, 基于生物力学仿真软件 Anybody, 根据行员的生理数据进行人体建模和“飞行员-座椅”模型耦合。其次, 改变座椅高度和椅背倾角对肌肉活动、关

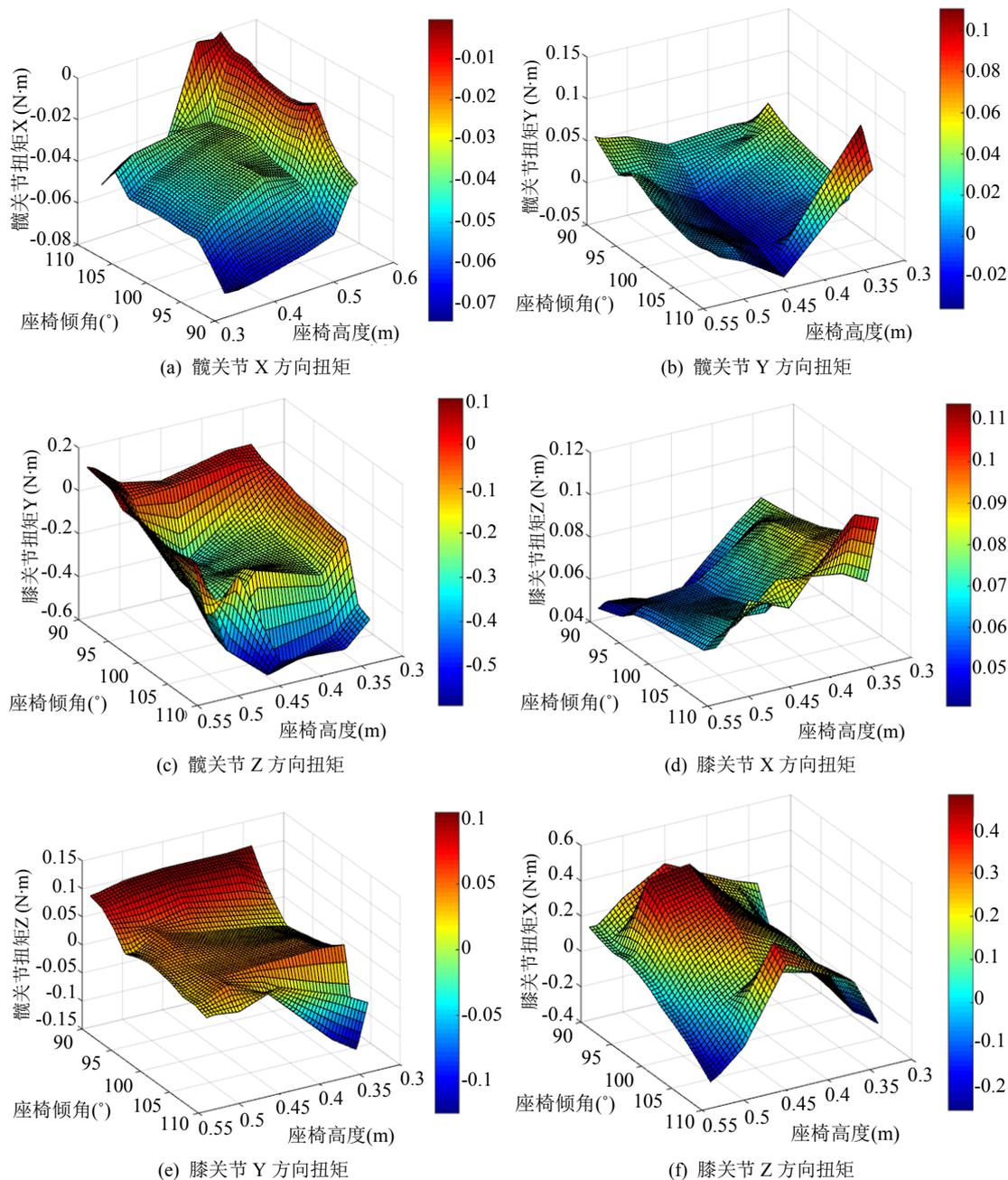


Figure 8. The response chart of main joint torque when the seat height and the back angle change
图 8. 主要关节扭矩随座高、椅背倾角的变化图

Table 6. Criterion judgment matrix
表 6. 准则层判断矩阵

	竖脊肌	背阔肌	臀大肌	臀中肌
竖脊肌	1	2	0.333	0.5
背阔肌	0.5	1	4	3
臀大肌	3	0.25	1	2
臀中肌	2	0.333	0.5	1

Table 7. Program level judgment matrix
表 7. 方案层判断矩阵

	平均值	方差	差值平方和
平均值	1	5	7
方差	0.2	1	3
差值平方和	0.1429	0.3333	1

Table 8. The weight of each factor on sitting comfort
表 8. 各因素对坐姿舒适性影响的权重

因素	权重	因素	权重	因素	权重
竖脊肌平均值	0.1145	竖脊肌方差	0.0229	竖脊肌差值平方和	0.0163
背阔肌平均值	0.0573	背阔肌方差	0.0114	背阔肌差值平方和	0.0082
臀大肌平均值	0.3435	臀大肌方差	0.0687	臀大肌差值平方和	0.0489
臀中肌平均值	0.2290	臀中肌方差	0.0458	臀中肌差值平方和	0.0326

节扭矩两个生物力学评价指标变化情况进行坐姿舒适性分析。最后, 选取对坐姿舒适性反应敏感的肌肉活动为代表, 通过肌肉活动的均值、方差和差值平方和这三个参数坐姿舒适性进行评价。采用本文方法得出的评价结果与国军标中推荐的座椅高度和椅背倾角参数十分接近, 证明了方法的有效性。

基金项目

国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(U1333119), 国防基础科研计划重点项目(JCKY2013605B002)。

参考文献 (References)

- [1] Rolfe, J.M. (1976) Human Factors and Flight Deck Design. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, **48**, 6-22. <https://doi.org/10.1108/eb035352>
- [2] 陈迎春, 宋文滨, 刘洪. 民用飞机总体设计[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2010.
- [3] Nishimatsu, T., Hayakawa, H., Shimizu, Y. and Toba, E. (2000) Influence of Top Coated Cloth for Sitting Comfort of Car Driver's Seat. *Proceedings of the 17th IEEE on Instrumentation and Measurement Technology Conference*, **2**, 915-919. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2000.848865>
- [4] Wibawa, A.D., Verdonschot, N., Burgerhof, J.G.M., et al. (2013) A Validation Study on Muscle Activity Prediction of a Lower Limb Musculoskeletal Model Using EMG during Normal Walking. *2013 3rd International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering*, Bandung, 7-8 November 2013, 260-264. <https://doi.org/10.1109/icici-bme.2013.6698504>
- [5] Sun, S., Wu, Q., Chai, C. and Xiong, Y. (2006) A Driving Posture Prediction Method Based on Driver Comfort. *2006 7th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design*, Hangzhou, 7-9 November 2006, 1-5. <https://doi.org/10.1109/caidcd.2006.329344>
- [6] 高飞, 项忠霞, 赵明, 等. 基于 Anybody 的自行车骑行运动仿真与试验分析[J]. *机械设计*, 2016, 33(1): 105-110.
- [7] 刘书朋, 司文, 严壮志, 许昌威. 基于 AnyBody™ 技术的人体运动建模方法[J]. *生物医学工程进展*, 2010, 31(3): 131-134.
- [8] 邱树华, 韩玉清, 严振国. 正常人体解剖学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988.
- [9] 华猛. 基于 AnyBody 生物力学仿真的驾驶姿势舒适机理研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [10] 桑春蕾. 驾驶员骨骼肌肉生物力学建模及坐姿舒适性研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [11] 黄珊, 江岳春, 陈旭, 周虎. 基于特征值和 G1 法的电力需求侧能效指标筛选优化[J]. *微计算机信息*, 2010, 26(36): 24-26.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：csa@hanspub.org