

文章编号: 2095-2163(2020)01-0214-05

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

# 基于虚拟仿真的 UAV 地面站操作舒适性评价研究

张 丽, 何法江

(上海工程技术大学, 上海 201620)

**摘要:** 基于 CATIA 虚拟建模技术, 以中国飞行员的人体尺寸数据为基础, 建立了中国飞行员数字化的人体模型; 在人体多刚体运动学模型的基础上, 建立了人体运动学连杆模型, 利用 Matlab 数字仿真, 对 MIL-STD 标准进行了优化, 拟合出中国飞行员的操作舒适性范围, 以某型号无人机地面站为例, 对其进行操作舒适性验证分析, 结果表明该地面站的主要操纵装置基本位于操作舒适性范围; 通过 CATIA 中的 RULA 分析工具, 进一步对该地面站的操作舒适性进行了评价分析, 得分结果证明该地面站设计合理, 操作舒适性良好。

**关键词:** 虚拟人体模型; 舒适度分析; CATIA 虚拟建模; Matlab 仿真

## Research on evaluation of operational comfort of UAV ground station based on virtual simulation

ZHANG Li, HE Fajiang

(Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**[Abstract]** The digital model of Chinese pilots is established by CATIA virtual modeling technology, based on the human body size data of Chinese pilots; The human kinematics linkage model is established based on the multi-rigid kinematics model of human body. The operating comfort range of Chinese pilots is simulated by Matlab based on the optimized MIL-STD. Taking a certain type of unmanned aerial vehicle ground station as an example, the operational comfort analysis is carried out, and the results show that the main operating device of the ground station is located in the operating comfort range; The operational comfort of the ground station is further evaluated and analyzed by the RULA analysis tool in CATIA and the score proves that the ground station is designed reasonably and with good operation comfort.

**[Key words]** virtual human body model; comfort analysis; CATIA virtual modeling; Matlab simulation

### 0 引言

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)因其众多优点,如体积小、使用便捷、环境适应能力强等,目前在各个国家中都成为了一大热点。近年来,科学技术不断发展,关于无人机自主控制的研究技术越来越成熟,然而,在实际任务执行过程中,很多时候都需要地面站的飞行员根据实际战况及时发出控制指令,飞行员仍然拥有飞机控制的最终决定权。因此,在无人机地面站的设计中,必须进行操作舒适性评价,然而采用真人真机进行实验不仅成本高、风险大,而且耗时耗力,为此目前广泛采用的是计算机虚拟仿真技术,利用数字化的人体模型和无人机地面站的三维模型,来进行操作舒适性分析。

在虚拟建模技术的工程应用研究方面, Sanjog 等人<sup>[1]</sup>对虚拟人体建模技术在航空领域的应用与发展进行了综述,形成了关于数字人体建模在航空和航天工业应用中的综合知识体系。Abbasov 等

人<sup>[2]</sup>研究了 Be-200 飞机驾驶舱的虚拟建模与飞行员执行任务时的操作舒适性问题,通过 Spline Extrude, Polygon Extrude 方法进行建模,建立了各种飞机机舱布局的真实场景。Karmakar 等人<sup>[3]</sup>针对喷气式飞机的飞行员,对其工作状态下的视域进行了分析。杜娟<sup>[4]</sup>以参数化方法建立了人体模型骨骼体系,实现了三维人体模型动态显示。在驾驶舱优化方面,钮松<sup>[5]</sup>利用遗传算法对驾驶舱布局进行了优化,基于匹配度原理,通过计算机仿真建立了驾驶舱布局模型。Liu 等人<sup>[6]</sup>在确定目标函数时,采用了最小欧氏距离的计算方法,通过 PSO 算法来对飞机驾驶舱的布局设计进行了优化。

本文利用 CATIA 虚拟建模仿真技术,构建了符合中国飞行员人体尺寸的数字化人体模型,建立了人体运动学连杆模型,通过 Matlab 拟合了人体操作舒适性范围,结合 RULA 评价方法,对某型号无人机地面站进行操作舒适性分析。

**作者简介:** 张 丽(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向:航空人因工程设计;何法江(1965-),男,教授,主要研究方向:航空装备设计与制造。

收稿日期: 2019-10-14

### 1 数字化人体模型的建立

数字化人体模型是指在计算机中构建的可视化虚拟人体,在形态和动态上极具人类特征,可以在虚拟环境中根据不同指令完成各式各样的任务。

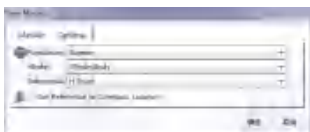
CATIA 的 Safe Work 模块中,与人体模型建立相关的是人体模型构造模块 HBR(Human Builder)和人体模型尺寸编辑模块 HME(Human Measurements Editor)。其中,HBR 模块主要用于建立一个可以进行互动仿真分析的数字化人体模型,这是基于一种最佳人体模型分类系统的,可以非常精确地模拟人体的静态和动态特征,用于精准的仿真分析,评估人与产品的舒适性。HME 模块可以个性化地修改人体参数,创建自定义的数字化人体模型。本文采用的仿真软件为 CATIA V5-6R2014,在 CATIA V5 中,提供了 103 个可供修改的人体参数或操作临界参数,诸如身高、上肢长、下肢长、坐高等参数,另外还可以定义平均值和标准差,通过使用多分布的方法,确保建立的人体模型在更大程度上接近实际人体。

要建立本文所需的符合中国飞行员人体尺寸参数的虚拟人模型,需要在 HB 模块中建立一个基础的人体模型。在数字化人体模型建立的初始阶段,需要从系统预设的人体模型库中选择一个人体模型范本,用于后期的尺寸编辑等个性化定制操作。人体尺寸参数在不同国家、不同地区的人群之间存在很大的差异。CATIA V5 预设的人体模型库中只有美国、加拿大、法国、日本、韩国这五个代表性的国家,却没有中国的人体模型,因此在初始建模时,只能初步选择和中国人尺寸最为接近的韩国人的人体模型。本文在设计时需要分别选取第 5 百分位、第 50 百分位和 95 百分位的人体尺寸,从而满足大部分人的要求。研究选取的是第 50% 的韩国人的人体模型基准如图 1 所示。



(a) 类别选择界面 1

(a) Category selection interface 1



(b) 类别选择界面 2

(b) Category selection interface 2

图 1 虚拟人体模型类别选择

Fig. 1 Virtual mannequin category selection

当人体模型基准选择完毕以后,初始的人体模型就建立了,如图 2 所示。然而,如果直接使用韩国人的数字化人体模型进行仿真,会降低实验的可信度,因此需要根据调查数据,选取中国飞行员实际的人体测量参数<sup>[7]</sup>,将建立的人体模型修改为中国飞行员的数字模型。

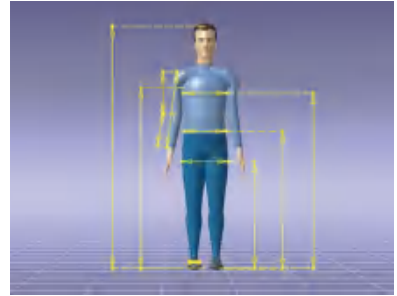


图 2 初步建立的人体模型

Fig. 2 Preliminary established mannequin

通过 Human Measurements Editor 模块将各项人体尺寸按照标准中的参数进行修改,得到符合中国飞行员人体尺寸的数字化人体模型。CATIA V5 可以根据虚拟人的立姿和坐姿两种状态对不同的尺寸项目进行修改,这是因为有些尺寸参数只有在特定的姿态下进行测量才更加准确,减少测量误差,如立姿状态下可以修改身高、上肢长度、下肢长度等参数,坐姿状态下可以修改坐姿眼高、坐深、坐宽等参数。研究给出的在立姿状态下可修改的参数,如图 3 所示。

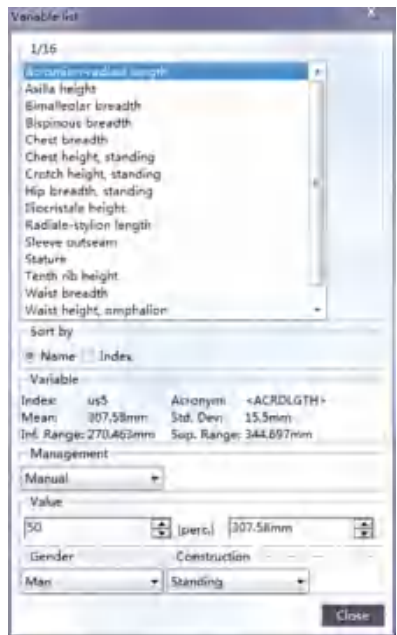


图 3 虚拟人立姿状态可修改的参数

Fig. 3 Modifiable parameters of virtual person's standing state

通过以上步骤分别建立得到相应的第 5%、50%

和95%的中国飞行员人体模型,用于后续的仿真分析。

### 2 操作舒适性仿真分析

通过飞行员的虚拟人体模型,对无人机地面站进行操作舒适性仿真分析,当飞行员在正常工作状态时,分析该姿态下的人体舒适性。对此可得研究阐释如下。

#### 2.1 操作舒适性范围求解

根据美军对于驾驶舱的相关研究,在坐姿工作状态下,手部操作的舒适范围如图4所示。

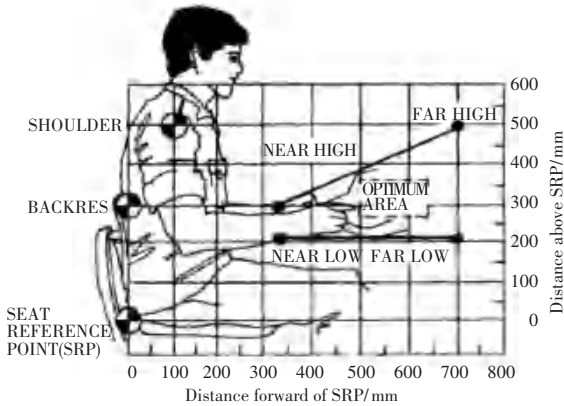


图4 MIL-STD 中的操作舒适性范围

Fig. 4 Operating comfort range in MIL-STD

由图4可以看出,MIL-STD中,以坐位点SRP为参考点,则手部操作的最佳舒适性范围是距离坐位点水平距离500~640mm、垂直距离260~360mm范围内,由于图4中并未标明眼位点的坐标位置,因此根据图像位置进行估测,得到手部操作的舒适性范围大约为距离眼位点水平距离260~400mm、垂直距离300~400mm范围内。

然而,该结论是针对美国人的身体尺寸参数研究得出的,不一定适用于中国的飞行员,因此,需要在中国飞行员人体模型的基础上,研究得到符合中国飞行员的手部操作可达性范围以及舒适性范围。

本文在人体多刚体运动学模型的基础上进行简化和改进,提取了手部可达性范围研究所涉及到的相关人体部位,建立了人体运动学连杆模型。人体运动学连杆模型在工作状态下的示意图如图5所示。

图5中, $S_1$ 表示眼位点, $S_2$ 表示枕突点, $S_3$ 表示颈关节点, $S_4$ 表示肩关节点, $S_5$ 表示肘关节点, $S_6$ 表示手部参考点, $l_1$ 表示颈部关节点到眼睛的垂直距离, $l_2$ 表示颈部关节点到坐位点的距离, $l_3$ 表示肩关节点到坐位点的距离, $l_4$ 表示上臂长度, $l_5$ 表示前臂和手的长度, $\alpha_{ub}$ 表示上臂与躯干的夹角, $\alpha_{qb}$ 表示

前臂弯曲角度, $\theta'$ 表示躯干轴线和垂直方向的夹角,等于座椅靠背倾角。

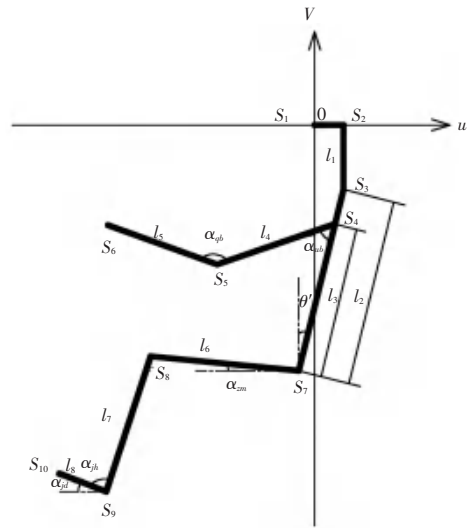


图5 人体运动学连杆模型

Fig. 5 Human kinematics linkage model

手部参考点 $S_6(S_{6x}, S_{6y})$ 的坐标可用下式计算,即:

$$\begin{cases} S_{6x} = j - (l_2 - l_3) \sin \theta' - l_4 \sin (\alpha_{ub} + \theta') - l_5 \sin (\alpha_{qb} + \alpha_{ub} + \theta'); \\ S_{6y} = -l_1 - (l_2 - l_3) \cos \theta' - l_4 \cos (\alpha_{ub} + \theta') - l_5 \cos (\alpha_{qb} + \alpha_{ub} + \theta'). \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\theta'$ 的范围为 $12^\circ \sim 37^\circ$ ,计算时选取 $\theta' = 15^\circ$ ; $\alpha_{ub}$ 的舒适性范围为 $0^\circ \sim 5^\circ$ , $\alpha_{qb}$ 的舒适性范围为 $60^\circ \sim 100^\circ$ ,经过实验证明,当 $\alpha_{qb} < 70^\circ$ 时,操纵杆的所在手托装置将会和腿部发生干涉,为了给手托装置预留安装空间, $\alpha_{qb}$ 的最小值定为 $70^\circ$ ,公式涉及到的飞行员人体尺寸参数见表1。

表1 手部操作舒适性范围涉及的人体参数

Tab. 1 Human parameters involved in the range of hand operation comfort

测量项目	百分位数		
	5	50	95
$j$	177	189	201
$l_1$	133	137	141
$l_2$	645	679	715
$l_3$	570	608	645
$l_4$	293	315	342
$l_5$	385	419	451

分别取 $\alpha_{ub}$ 为 $0^\circ$ 和 $5^\circ$ ,取 $\alpha_{qb}$ 在 $70^\circ \sim 100^\circ$ 之间步长变化为0.1,即可求出操作舒适性范围,经Matlab计算可得拟合结果如图6所示。

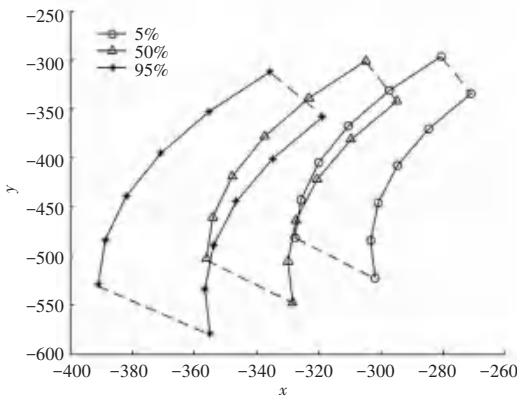


图 6 中国飞行员操作舒适性范围

Fig. 6 Chinese pilot operating comfort range

图 6 中,带圆圈的线围成的面积表示第 5% 的飞行员手部操作的舒适性范围,同理带三角形和星号的线所围的面积分别表示第 50% 和第 95% 的飞行员手部操作舒适性范围。以某型号的无人机地面站为例,经分析验证,该地面站的主要操纵设备基本位于图 6 中的手部操作舒适性范围内,因此初步认为该地面站的设计合理。

### 2.2 RULA 评价分析

为了更加可靠、准确地验证操控台布局的合理性,本文还将采用 RULA 评价法进一步地对操作舒适性进行验证分析。

RULA 是一种简便的工作姿态分析方法,通过建立人体模型,以人体姿势为主要依据,同时考虑动作状态和肌肉力的使用,以评分的形式来判断操作过程中是否有姿势不符合人体正常姿势习惯或可能产生损伤的情况,被广泛应用于训练工效评估。

RULA 评价法在评分过程中,首先将身体分为上肢和躯干两大部分,分别对这两部分进行测评,先测量每个部分中各关节的评分,然后根据各关节对应的不同得分,分别得出上肢和躯干两部分的评分,随后再将两部分结合,得出 RULA 总评分,最后根据 RULA 总得分来确定该动作的舒适度等级。RULA 评分的判断标准如图 7~图 9 所示。其中,各颜色所代表的分值见表 2。

表 2 评分标准

Tab. 2 Standard of grading

颜色	评分
绿色	+1
黄色	+2
橙色	+3
红色	+4

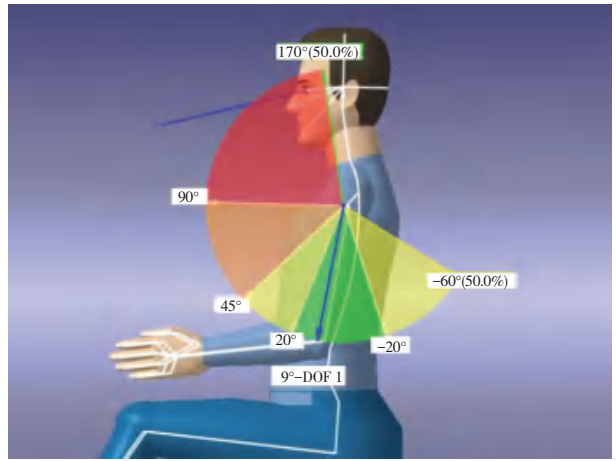


图 7 上臂姿势评分标准范围

Fig. 7 Scoring standard range of upper arm posture

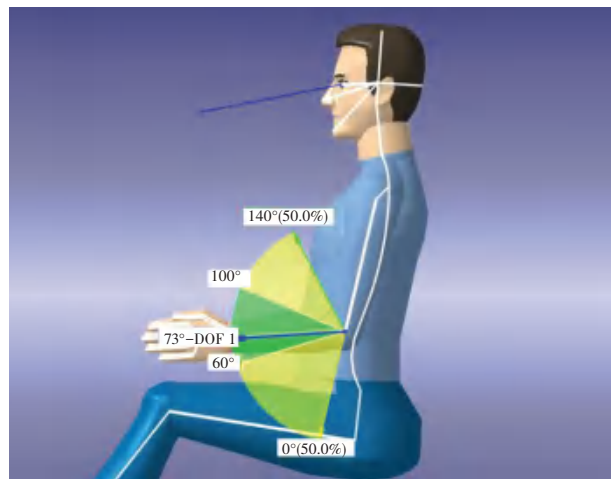


图 8 前臂姿势评分标准范围

Fig. 8 Scoring standard range of forearm posture

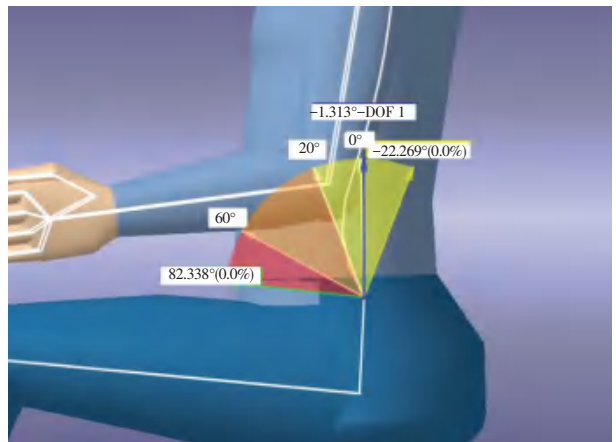


图 9 躯干姿势评分标准范围

Fig. 9 Scoring standard range of trunk posture

根据 RULA 的总分,对于人体姿态的评分共分为 4 个等级,详见表 3。

表3 RULA 舒适性等级  
Tab. 3 RULA comfort level

等级	总分	说明
1	1~2	比较舒适,可接受
2	3~4	稍有不舒适,不可长时间保持
3	5~6	较为不舒适,需尽快更换姿势
4	>6	不舒适,需立即更换姿势

通过 CATIA 对某型号无人机地面站进行 RULA 评估,结果如图 10 所示。除前臂和手腕部分得分为 2,其余部分得分均为 1 分,属于 RULA 舒适性等级中的 1 级,说明飞行员处于该工作姿态下是比较舒适的,因此证明了该无人机地面站的设计合理,飞行员的操作舒适性良好。

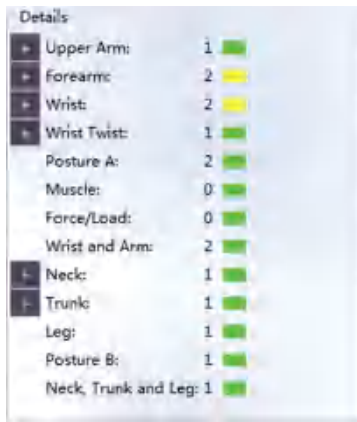


图 10 RULA 姿态评估得分

Fig. 10 RULA posture assessment score

### 3 结束语

本文以中国飞行员的人体尺寸数据为基础,在 CATIA 平台中建立了中国飞行员数字化的人体模型和人体运动学连杆模型,并通过 Matlab 仿真拟合出了中国飞行员的操作舒适性范围,用该范围对某型号无人机地面站操作舒适性验证,结果表明该地面站的主要操纵装置基本位于操作舒适性范围;同时,利用 RULA 分析工具,进一步对该地面站的操作舒适性进行了评价分析,得分均 $\leq 2$ ,说明飞行员的工作姿态是比较舒适的,进一步证明了该地面站操作舒适性良好。

### 参考文献

- [1] SANJOG J, KARMAKAR S, PATEL T, et al. Towards virtual ergonomics; Aviation and aerospace[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2015, 87(3):266-273.
- [2] ABBASOV I B, OREKHOV V V. Computational modeling of passenger amphibian aircraft Be-200 cabin interior[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 76:154-160.
- [3] KARMAKAR S, PAL M S, MAJUMDAR D, et al. Application of digital human modeling and simulation for vision analysis of pilots in a jet aircraft: A case study[J]. Work - A Journal of Prevention Assessment & Rehabilitation, 2012, 41(S1):3412-3418.
- [4] 杜娟. 面向民机驾驶舱人机工程的人体建模关键技术研究[D]. 西安:西北工业大学, 2006.
- [5] 钮松. 面向民机驾驶舱人机工效设计的布局优化研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.
- [6] LIU Xin, YU Suihai, GONG Tiancheng, et al. Ergonomics layout optimization of the aircraft cockpit based on particle swarm optimization[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1044-1045:1851-1854.
- [7] GJB 4856-2003. 中国男性飞行员人体尺寸[S]. 北京:中国人民解放军总装备部, 2003.

(上接第 213 页)

### 3 结束语

成本分摊系统 ETL 部分的成功实施,对数据抽取、转换、装载的过程有了更明确的分工。通过将各个子系统数据经过抽取、转换、装载成符合要求的数据,并且拥有较高的数据质量。

在以后的工作中,研究拟将各个子系统的数据库整合到数据仓库中,在需要开发新系统对接数据时,只需对接数据仓库,而无需再对接各个子系统,这将会大大减少开发成本。

### 参考文献

- [1] 解筱,张克,任伯群,等. ETL 技术在商业银行数据整合中的研

究与应用[J]. 信息技术与信息化, 2019(7):45-47.

- [2] 周飞,刘梦娜,张晖,等. 商业银行数据仓库系统中 ETL 的设计与实现[J]. 软件工程, 2018, 21(11):42-45.
- [3] 王卓昊,杨冬菊,徐晨阳. 基于 ISE 算法的分布式 ETL 任务调度策略研究[J/OL]. 计算机科学:1-11[2019-08-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1075.TP.20190821.1158.010.html>.
- [4] 赵振伦,李佳平. 银行统计信息系统的设计与实现[J]. 中国管理信息化, 2017, 20(4):163-164.
- [5] Teradata Corporation. High-throughput extract-transform-load (ETL) of program events for subsequent analysis: US, US2015142725(A1)[P]. 2015-05-21.