

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2016.04.003

运输机方向舵脚蹬人机工效设计研究

Transport Aircraft Rudder Pedal Design Ergonomic Research

李朋 张凯 冯虎祥 薛海明 / LI Peng ZHANG Kai FENG Huxiang XUE Haiming
(中航飞机研发中心, 陕西 723000)
(Research and Development Centre, AVIC Aircraft Co., Ltd, Shaanxi, China)

摘要:

方向舵脚蹬是飞机航向控制的操纵机构,脚蹬人机工效设计的优劣,不仅影响着驾驶员下肢操纵的可达性与舒适度,同时也对飞机安全驾驶存在一定的安全隐患。运输机方向舵脚蹬设计通过对人体生理特征和人体生物力学的研究,利用经验公式,结合人体舒适坐姿二维简化模型和人体尺寸,对人体下肢操纵可达范围,脚蹬运动行程、踵点设计等进行理论分析和计算,得到运输机方向舵脚蹬的人机工效设计指标参数,并通过人机工效仿真软件进行虚拟仿真,最终得到一些合理、可用的设计参数,为运输机方向舵脚蹬人机工效设计提供理论支持和方法指导。

关键词:运输机;脚蹬;人机工效;设计参数;虚拟仿真

中图分类号:V227

文献标识码:A

[Abstract] Pedals are the operating mechanism of the plane heading control. The pros and cons of ergonomic design, not only affect the manipulation of lower limbs driver accessibility and comfort, but also has certain security hidden danger of safe driving to the aircraft. By the study of human physiological characteristics and the biological mechanics, using the empirical formula, combined with the human body comfortable sitting posture simplified 2 d model and human body size, scope of lower limbs manipulation and the pedal travelling, were analyzed and calculated theoretically, and the aircraft rudder pedal ergonomic design parameters were got. Being virtually simulating By the simulation software for ergonomics, the reasonable and available design parameters were finally achieved. The research can provide theoretical support and method guidance for the conveyor pedals ergonomic design.

[Keywords] transport aircraft; pedal; ergonomic; design parameter; virtual simulation

0 引言

脚蹬是控制飞机方向舵的操纵机构,通过垂直尾翼上的空气动力产生对飞机的偏航力矩,实现飞机航向的偏转。脚蹬参考点位置的高低、脚蹬运动行程的大小、操纵力,以及脚踏板的角度、大小和间距等人机工效设计参数设计合理与否不仅关系驾驶员的舒适操纵,更关系着飞行驾驶的安全。脚蹬参考点距离座椅参考点设计距离过大会不满足身

材偏小的驾驶员的可达性,距离过小则会造成身材高大的驾驶员的操纵舒适性较低;同时脚蹬参考点距离驾驶舱地板过高时会使驾驶员双腿悬空,从而引起驾驶员下肢操作疲劳和不适感,过低会造成舒适度和可达性较低;脚蹬运动行程或操纵力过大时会造成驾驶员一只腿抬腿过高,容易和驾驶杆等发生干涉,且引起驾驶员操纵疲劳,行程或操纵力过小则会导致不易操纵,容易引发人为差错从而诱发安全事故。因此,脚蹬人机工效参数设计尤为重要。

[基金项目] 航空科学基金支持课题“运输机驾驶舱总体布局人机工效分析”研究成果,项目编号:2013ZAN4。

方向舵脚蹬人机工效设计,根据驾驶员舒适坐姿人体二维简化模型,结合人体测量静态尺寸,在人体二维简化模型中,将人体的脚跟置于踏板上,脚跟与踏板支点接触,即为踵点。利用经验公式可以计算出驾驶员下肢可达范围、脚蹬运动行程、脚蹬踵点等人机工效设计参数,并通过人机工效仿真软件对不同人体百分位的驾驶员进行下肢可达性虚拟仿真,根据仿真结果对设计参数进行修正和完善,运输机方向舵脚蹬人机工效设计研究可为脚蹬设计提供理论支持和方法指导。

1 下肢操纵力分析

脚蹬运动是驾驶员在坐姿形态下通过下肢对脚踏板的蹬踏来实现对飞机航向的控制。一般坐姿时,右脚蹬力大于左脚,男性脚力大于女性。人体下肢的操纵力大小与腿部的膝关节角度有关。人体生物体力学实验结果表明:坐姿操作情况下,当脚蹬用力小于 227N ^[1]时,膝关节角度以 107° 为宜;当脚蹬用力大于 227N 时,膝关节角度以 130° 为宜(飞机方向舵的推荐许用力值为 272N)。用脚前端进行操作时,脚踏板上的许用力值不宜超过 60N ;用脚和腿同时操作时,脚踏板上的许用力值可达 $1\ 200\text{N}$ 。

为了给操作者的下肢操纵提供反馈信息,脚踏板必须设计有一定的操纵阻力。考虑到驾驶员长时间操作的舒适性,根据人体力学实验标明,脚操纵器的最大操纵阻力不应大于 264N ,否则驾驶员易产生疲劳。为防止在操作过程中驾驶员对脚踏板的无意操作,脚踏板应有一个最小阻力,该最小阻力应至少超过操作者腿休息时脚踏板所承受力,一般取值为 50N 。因此脚踏板阻力应设置在 $50\text{N} \sim 264\text{N}$ 之间。

综合考虑驾驶员下肢在不同位置时的操纵力及操纵舒适度影响,为使驾驶员处于最舒适的驾驶姿势,脚踏板设计时驾驶员下肢位置关系应参考以下角度值:大腿切角取 $5^\circ \leq \alpha_1 \leq 15^\circ$ ^[2];膝关节角度取 $100^\circ \leq \alpha_2 \leq 135^\circ$;脚与小腿部夹角取 $90^\circ \leq \alpha_3 \leq 120^\circ$ 。如图 1 所示。

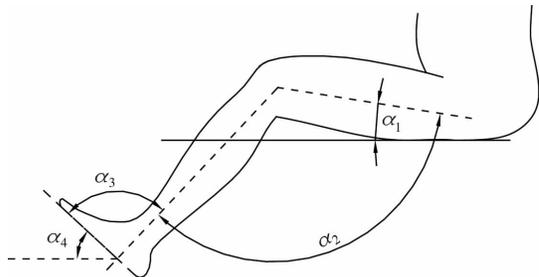


图 1 驾驶员下肢操纵位置关系

并且还应当注意的是:人体肢体所有力量的大小,都与持续的时间有关,施力大小与持续时间关系如图 2 所示。随着持续时间的延长,操纵舒适度的下降,肢体的力量很快衰弱。根据人体力学静态施力大小和持续时间的关系,下肢的操纵力持续时间 t_{\max} 与肌肉施力的大小 F 和最大肌理 F_{\max} 的比值 ($P = F/F_{\max}$) 有关。当 F/F_{\max} 趋近于 1.0 时,意味着人体在接近极限肌力的状态下工作,操纵力持续时间仅能维持几秒钟;而当 F/F_{\max} 趋近于 0.15 时,操纵力持续时间可以很长直至出现厌恶、枯燥等其他情绪。由此可以得出:在长时间工作情况下,人体肌肉势力大小不应大于最大肌力的 15% 。

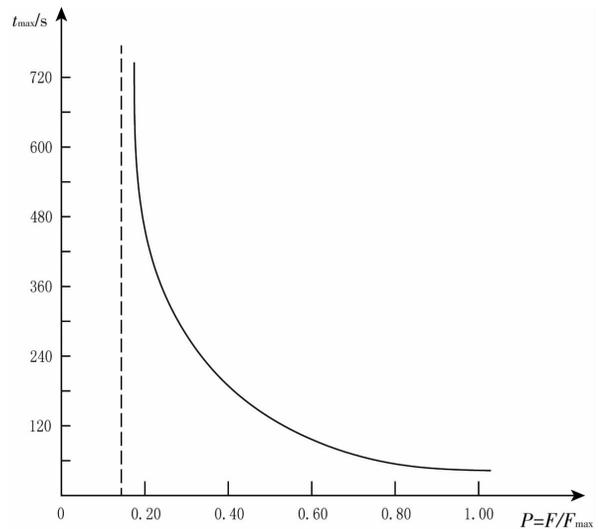


图 2 静态肌肉施力大小与持续时间的关系

2 驾驶员下肢可达区域分析

脚蹬设计首先应考虑下肢的可达范围。在人体舒适坐姿二维简化模型中,将人体的脚跟置于踏板上,脚跟与踏板支点接触,即踵点。踵点的位置根据驾驶员处于坐姿时的腿与脚的舒适姿势来确定。一般情况下,脚踏板的布置以踵点为空间定位点,如图 3 所示。图中 L_7 为臀膝距; L_8 为小腿长; L_9 为足高,为了计算方便,在这里认为 L_9 与 L_{10} 垂直; L_{10} 为内踝足跟距; θ_5 为大腿切角; θ_6 为膝关节角度; θ_7 为小腿与脚之间的夹角; θ_8 为脚底与地板的夹角,也即脚踏板与地板的夹角; X_3 为踵点与座椅中立位置水平距离; Y_3 为踵点距座椅面的垂直距离。

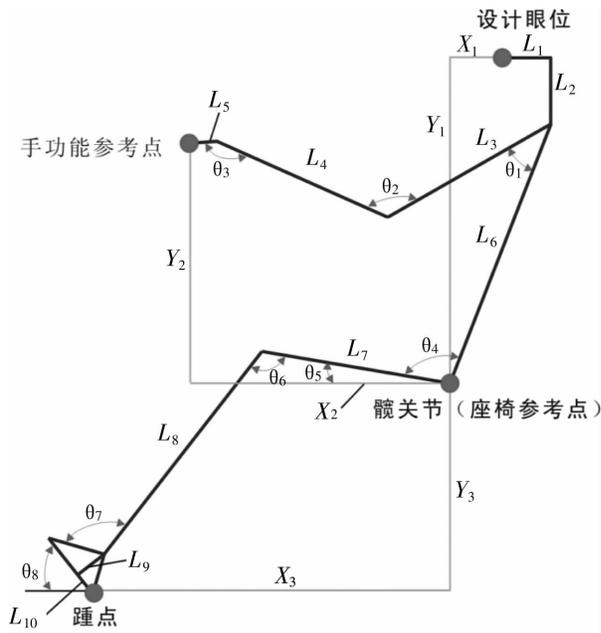


图3 人体二维简化模型^[3]

由图3可知,踵点与座椅中立位置的距离 X_{3p50} 为:

$$X_{3p50} = L_7 \times \cos\theta_5 + (L_8 + L_9) \times \cos(90^\circ - \theta_8) - L_{10} \times \cos\theta_8 \quad (1)$$

式中, L_7 、 L_8 、 L_9 、 L_{10} 分别取 GJB4856-2003 中运输机第50百分位的驾驶员的臀膝距、小腿长、足高、内踝足跟距。在下肢操纵力与舒适性分析时,大腿切角 θ_5 取 $5^\circ \sim 10^\circ$,而 θ_8 可以由其它角度值计算得到,即:

$$\begin{aligned} \theta_8 &= 180^\circ - (540^\circ - \theta_5 - \theta_6 - 270^\circ) \\ &= \theta_5 + \theta_6 - 90^\circ \end{aligned} \quad (2)$$

由下肢操纵力与舒适性分析得到的 θ_6 的取值范围为 $100^\circ \sim 135^\circ$,则脚踏踏板与地板的夹角 θ_8 的取值范围为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 。

将这些值分别代入式(1)、(2)中,得到 X_{3p50} 的标准值为 $605\text{mm} \sim 925\text{mm}$ 。

由图3可知,踵点距座位面高度 Y_{3p50} 为:

$$Y_{3p50} = (L_8 + L_9) \times \sin(90^\circ - \theta_8) + L_{10} \times \sin\theta_8 - L_7 \times \sin\theta_5 \quad (3)$$

式中, L_7 、 L_8 、 L_9 、 L_{10} 、 θ_5 、 θ_8 与计算 X_{3p50} 时取值一样,将这些数值代入式(3)中,得到 Y_{3p50} 的标准取值为 $135\text{mm} \sim 415\text{mm}$ 。

由此得出脚踏板踵点与座椅中立位置参考点水平距离范围为 $605\text{mm} \sim 925\text{mm}$,脚踏板踵点与座椅中立位置参考点垂直距离范围为 $135\text{mm} \sim 415\text{mm}$ 。如图4所示。

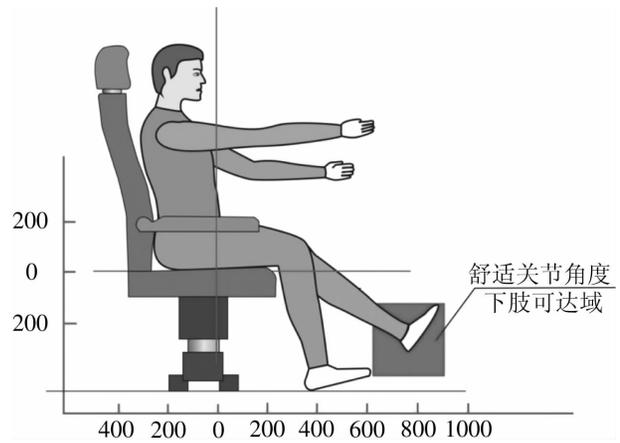


图4 下肢可舒适关节角度可达域

3 脚踏运动行程分析

为了保证操纵的可靠性,脚踏板的位移行程应适量。行程过小,不足以提供操作反馈;行程过大,易引起操作者的疲劳或影响正常操作。考虑到人体工学下肢操作舒适度的影响,为使驾驶员处于最舒适的驾驶姿势,脚踏板设计时驾驶员下肢位置关系应参考以下角度值:大腿切角取 $5^\circ \leq \alpha_1 \leq 15^\circ$;膝关节角度取 $100^\circ \leq \alpha_2 \leq 135^\circ$ 。即当脚踏板行程在最前端时大腿切角为 5° ,膝关节角度为 135° ;当脚踏板行程在最后端时大腿切角为 15° ,膝关节角度为 100° ,如图5所示。将第50百分位的驾驶员人体尺寸代入计算公式,可得出,在保证人体舒适的前提下,脚踏板前后运动行程最大值为 190mm 。根据人体坐姿势力特征分析及着装修正,脚踏板最佳运动行程为 $100\text{mm} \sim 180\text{mm}$ 。

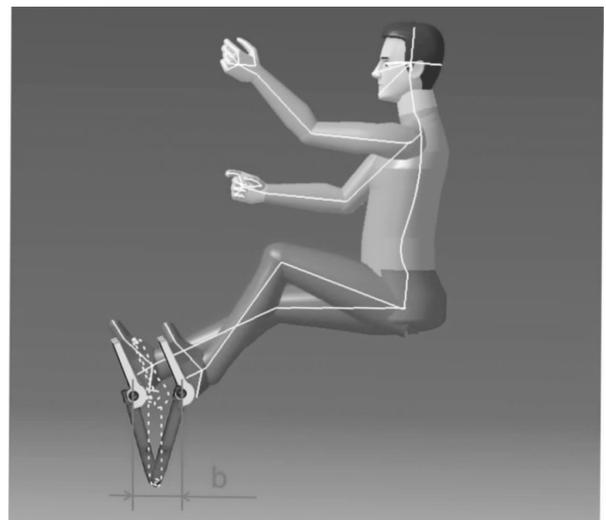


图5 脚踏板运动位置示意图

4 脚踏板中立位置参考点(踵点)分析

考虑到驾驶员在脚踏板操纵过程中舒适可达,脚踏板的重力位置确定应满足在前运动行程极限及后运动行程极限情况下,脚踏板运动轨迹始终处在人体下肢可达域内。因此,人体下肢可达域前后极限除去脚踏板运动行程量即为脚踏板中立位置参考点取值范围。参考上述计算分析结果,脚踏板中立位置参考点取值范围为,与座椅参考点水平距离 655mm~875mm,脚踏板踵点与座椅参考点垂直距离取值范围为 165mm~385mm。

5 脚蹬人机工效设计参数

通过参考人体尺寸数据及人体施力特性分析,并根据着装、姿态等方面对数据进行修正,最终确定了方向舵脚蹬人机工效设计参数的部分推荐值分别见表 1、图 6。

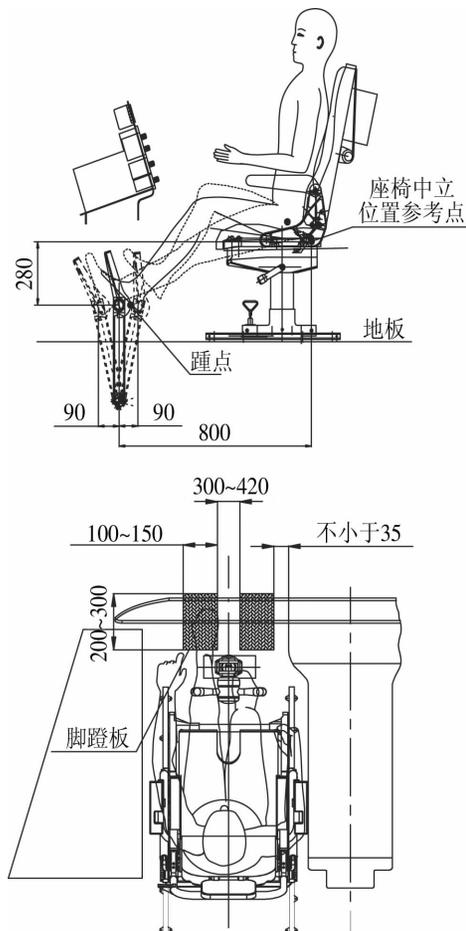


图 6 脚踏板人机工效设计参数(单位:mm)

表 1 脚蹬人机工效设计参数

名称	推荐值
脚踏板大小	长度:200 mm ~ 300 mm
	宽度:100 mm ~ 150 mm
脚蹬操纵阻力	50 N ~ 264 N
脚蹬运动行程	100 mm ~ 180 mm
脚踏板与地板角度	30° ~ 60°
脚踏板间距	300 mm ~ 420 mm
脚踏板与周围设备安全间隙	不小于 35 mm

6 脚蹬人机工效仿真

通过基于 CATIA Human builder 的人机工效分析软件,分别载入 5%、50%、95% 人体数据模型,对脚踏板中立位置参考点(踵点)取值范围及运动行程的前后极限进行了可达性仿真分析。分析结果表明,脚踏板运动行程前极限、后极限均能满足下肢可达性要求。如图 7、图 8 所示。

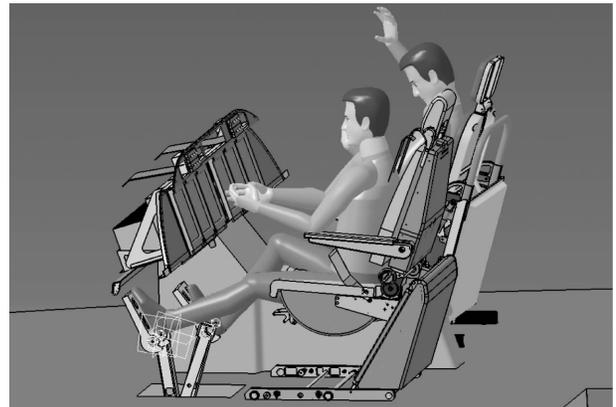


图 7 脚踏板前极限位置可达性分析

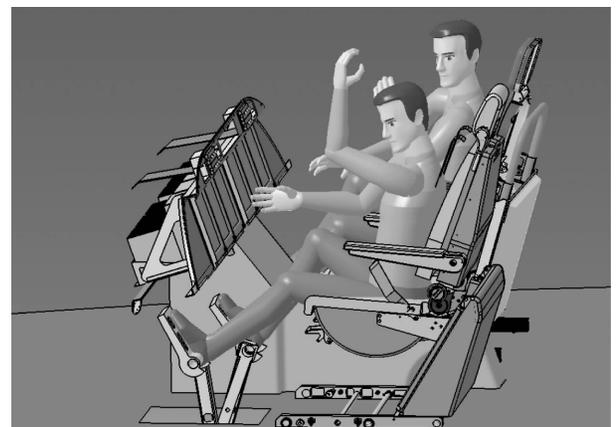


图 8 脚踏板后极限位置可达性分析

(下转第 49 页)

Reference

[1] TangChao, FangJunwei, XieLin, ZhangLei, XiaYubing. Application of MBSE Method During Landing Gear System Design for Civil Aircraft. Civil Aircraft Design and Research, 2015,3:56-60.

[2] Systems Engineering Fundamentals (DoD), January 2001.

[3] Chen Yinchun, Song Wenbin, Liu Hong. Civil Aircraft Design. 2012.

(上接第 16 页)

7 结论

本文根据中国人体下肢生理特征及生物力学特点,对人体下肢操纵力进行分析。结合下肢舒适坐姿关节角度和人体尺寸,利用简单几何关系,总结出驾驶员座椅人机工效设计经验公式,分析计算出运输机驾驶舱下肢可达范围,得到了运输机驾驶员下肢可达范围、脚蹬运动行程、脚蹬参考点(踵点)以及脚蹬人机工效设计参数,并进行了人机工效仿真软件仿真分析,结果表明,运输机方向舵脚蹬人机工效设计方法得当,设计参数指标合理、可

信,可指导运输机方向舵脚蹬人机工效设计。

参考文献:

[1] 丁玉兰,郭钢,赵江洪. 人机工程学[M]. 北京:北京理工大学,1991:127.

[2] 鞠峰. 飞机驾驶舱人机工程设计研究[D]. 西安:西北工业大学,2007.

[3] 张炜,马智,俞金海. 民机驾驶舱人机一体化设计[M] 西安:西北工业大学出版社,2015:91-93.

(上接第 44 页)

表 3 乘数系数变化表

票价浮动	50%	80%	90%	100%	110%	120%	150%	200%
乘数系数	2.42	2.91	3.03	3.13	3.22	3.40	3.81	4.50

上述预测对于短航程预测差距较大,因而当选择航程大于 500km 的航线进行分析时 $R^2 = 0.913$, 具有更好的预测结果。

同时,由于票价呈现年弱递减的趋势,如图 12 所示,因此,在进行长期预测时需考虑该因素。当然,长期预测时还需要考虑导入期、成长期、成熟期的增速区别。同样,可以在乘数系数中进行相应调整。



图 12 客公里收入趋势
(数据来源:IATA)

4 结论

民航客运票价主要采用竞争定价方式,同时结合成本因素。已开航线票价预测主要采用以时序为主的方法,拟开航线则可采用考虑供给、需求、航线距离和其它因素的引力模型进行预测。实践证明这是一套简洁可行且较为可信的方法。

参考文献:

[1] 俞桂杰. 航空公司航线决策中的旅客需求研究[D]. 天津:中国民航大学,2007.

[2] 张桥艳. 航线收益影响因素与预测方法研究[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院,2011.

[3] 鲁迪格·多恩布什,斯坦利·费希尔,理查德·斯塔兹. 宏观经济学[M]. 第十版. 北京:中国人民大学出版社,2010.

[4] 张伟. 国内民航客运需求价格点弹性与弧弹性研究[J]. 航空科学技术,2013(2):28-31.

[5] 张伟. 客座率浅析[J]. 民用飞机设计与研究,2012 年增刊:141-146.

[6] William M. Swan. Airline Demand distributions: Passenger Revenue Management and Spill[J]. Transportation Research Part E, 2002, 38(3-4): 253-263.