

基于 Jack 仿真的飞机除冰舱人机工程设计与优化

欧阳霜平¹, 姚湘^{1*}, 吕紫薇², 唐刚³

(1.湘潭大学, 湖南 湘潭 411105; 2.湖南第一师范学院, 长沙 410205;

3.长沙九十八号工业设计有限公司, 长沙 410205)

摘要: **目的** 改善飞机除冰舱的操作环境, 提高操作员的整体舒适度和工作效率。**方法** 通过对飞机除冰舱作业流程的分析, 确定操作员常见的操作姿态; 使用 Jack 软件, 对操作员可达域、可视域, 以及舒适度进行仿真模拟分析。基于这些分析结果, 对飞机除冰舱的外形以及左右扶手台等部件进行针对性的设计优化。**结果** 对优化设计方案分析后发现: 操作员观察飞机、喷枪的视野盲区减小, 常用操作手柄与开关按钮位于双手舒适可达范围内。**结论** 通过人机工程仿真技术可准确预判飞机除冰舱存在的人机工程设计缺陷, 提高了设计合理性, 为人-机-环境总体设计提供了参考。

关键词: 飞机除冰舱; 人因工程; 仿真技术; 适人性评价

中图分类号: TB472 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)04-0049-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.04.005

Ergonomics Design and Improvement of Aircraft De-icing Cabin Based on Jack Simulation

OUYANG Shuangping¹, YAO Xiang^{1*}, LYU Ziwei², TANG Gang³

(1. Xiangtan University, Hunan Xiangtan 411105, China; 2. Hunan First Normal University, Changsha 410205, China;

3. Changsha No. 98 Industrial Design Co., Ltd., Changsha 410205, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the operational conditions of the aircraft de-icing cabin and increase the operator's overall comfort and efficiency. The key postures of the operator were set by analyzing the operation process of the aircraft de-icing cabin. The operator's reach zones, view area, and comfort level were simulated and analyzed by the ergonomic simulator software-Jack. Based on these analysis results, the shape of the aircraft de-icing cabin and the left and right armrests were optimized. Through the analysis on the optimized design scheme, it was found that the operator's blind area of observing the aircraft and spray gun was reduced, and all operational handles and switches were now easily accessible with both hands. Ergonomic design errors in aircraft de-icing cabin can be predicted by ergonomic simulation technology, which can also improve design rationality and provide reference for design in the man-machine environment.

KEY WORDS: de-icing cabin; ergonomics; simulation technology; human-rating

冬季气温下降, 停放在机场的飞机表面容易结冰, 如果机翼结冰, 会使机翼表面变得粗糙, 飞机的空气动力性能变差, 降低了飞行安全性, 容易造成安全事故, 且大量的冰附着在机身上, 飞机质量加大, 也会降低飞机性能, 影响经济性。因此, 为了确保飞机能够正常飞行, 必须在起飞前 30 min 内进行除冰。目前, 自行式除冰车应用较为普遍。自行式除冰车主

要由除冰车、臂架、除冰舱组成。作业时, 由一人驾驶除冰车靠近飞机, 另一人坐在除冰舱内控制除冰舱的高度与位置, 绕飞机近距离以一定压力喷洒除冰液与防冰液^[1]。由于在除冰过程中, 除冰车与除冰舱需要贴近飞机进行除冰作业, 在寒冷、繁忙的机场, 除冰、防冰工作任务重、时间长, 且紧迫, 长时间高空、寒冷、精力集中作业, 非常容易使人疲劳, 在除冰作

收稿日期: 2023-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52375269); 国家社会科学基金艺术学一般项目 (20BG115)

*通信作者

业过程中容易与飞机碰撞刮擦。为避免除冰过程中造成损失或事故,在设计飞机除冰舱时,应特别注重人机工程部分的设计与分析,提升飞机除冰舱的舒适性和安全性^[2]。

相较于传统通过经验或实物验证的方式,目前基于仿真技术的人机工程设计具有设计周期短、成本低、效率高、准确性高等优点^[3]。采用仿真技术的人机工程设计方法得到广泛研究应用。张芳燕等^[4]利用人机工程仿真分析软件 Jack 对反铲式挖掘机驾驶室进行设计改进,优化了驾驶室的视野与舒适度。陈登凯等^[5]使用 Delmia 仿真软件系统地完成民机内饰典型部件的维修仿真分析任务,并给出明确的维修优化方向。赵川等^[6]提出了一种利用 Jack 软件视野投影的盒形图方法,并将这种方法成功运用到叉车护顶架的可视设计优化中。目前,针对飞机除冰舱进行人机工程仿真分析与设计改进的研究还较少。本研究选择飞机除冰舱作为研究对象,使用 Jack 人机工学仿真软件,对操作员手臂可达区域、视野范围,以及作业姿势舒适度进行仿真分析,并根据仿真结果对飞机除冰舱现有设计方案进行优化并重新验证。通过这种方法分析人机工程设计的缺陷,为除冰舱人-机-环境整体设计提供可行性参考^[7-8]。

1 飞机除冰舱人机工程仿真分析流程

1.1 飞机除冰舱使用流程

操作员操作飞机除冰舱常用部件的难易程度会直接影响到操作员的舒适性,进而影响其工作效率。通过对飞机除冰舱作业全流程的实地调研观察,将飞机除冰舱主要分为作业准备、作业进行、作业完成三个阶段,见表 1。

表 1 飞机除冰舱作业流程分析
Tab.1 Analysis of operation process in aircraft de-icing cabin

阶段	流程	操作方式	姿势
作业准备	进舱	关闭照明雨刷	举右手拨开关
	举升定位	举升舱体靠近除冰部位	左手操作手柄
		调整大臂角度	
		调整舱体位置	
作业进行	除冰喷洒	启动除冰泵	双手操作手柄或按左右扶手台按键
		观察压力表	
		启动喷洒除冰/防冰	
		观察窗外环境	
作业完成	降落出舱	舱体沿除冰部位移动	左手操作手柄
		部位完成停止喷洒	
		关闭照明雨刷	举右手拨开关

- 1) 作业准备阶段,操作员进入舱体后,需举起右手通过按键开关启动除冰舱内外的照明、除雾、雨刷等功能。此时姿势为坐姿、举右手,并抬头观察右手操作。当除冰舱举升到空中靠近飞机需除冰部位定位时,操作员需双手操作两侧扶手台手柄,并且需要观察前方与两侧的周围环境。
- 2) 作业进行阶段,操作员需要操作两侧扶手台上的开关按键启动除冰液喷洒等功能,同时需操作两侧手柄对除冰舱进行移动,眼睛需要密切关注前方喷洒状况,以及周边环境。
- 3) 作业完成阶段,操作员需举起右手通过按键开关关闭除冰舱内外的照明、除雾、雨刷等功能,然后爬出舱体。

1.2 飞机除冰舱仿真应用流程

Jack 人机工程仿真分析软件能验证设计的合理性,提高研发效率^[9]。根据 Jack 软件提供的分析工具,以及飞机除冰车设计标准^[10],综合考虑操作人员的工作流程、评估指标,绘制飞机除冰舱人机工程仿真分析流程图,如图 1 所示。

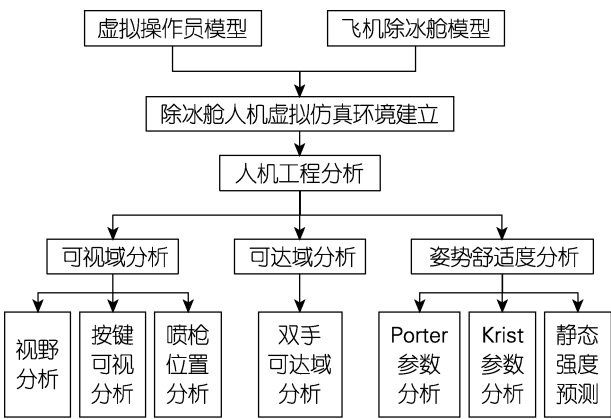


图 1 飞机除冰舱人机工程仿真分析流程
Fig.1 Process of ergonomic simulation and analysis of aircraft de-icing cabin

2 飞机除冰舱人机工程仿真分析

2.1 飞机除冰舱操作员模型建立

根据除冰舱人机仿真需求,以及 GB 10000—1988《中国成年人人体尺寸》^[11],构建除冰舱操作员人体模型。在进行飞机除冰舱仿真时,其结果需适用于大部分操作员,属于平均尺寸设计。因此,本文主要采用第 50 百分位人体数值,部分尺寸参考第 5 百分位和第 95 百分位数值,主要尺寸如表 2 所示。

根据中国成年男性 18~60 岁主要人体尺寸,在 Jack 软件中建立百分位虚拟操作员人体模型,如图 2 所示。

表 2 中国成年男性 18~60 岁主要人体尺寸
Tab.2 Main body size of Chinese adult male aged 18-60
mm

项目	5%人体数值	50%人体数值	95%人体数值
身高	1 583	1 678	1 775
上臂长	289	313	338
前臂长	216	237	258
大腿长	428	465	505
小腿长	338	369	403
肩宽	344	375	403
臀宽	282	306	346

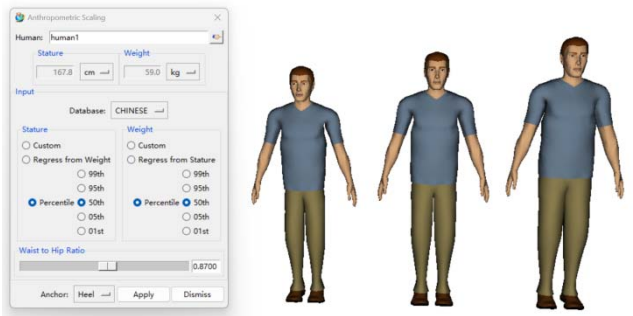


图 2 精确尺寸百分位数字人体模型
Fig.2 Precise size percentile digital mannequin

2.2 飞机除冰舱人机仿真环境建立

根据某型飞机除冰舱尺寸,在 Rhino 中建立飞机、除冰舱三维数字模型,然后导入 Jack 软件中,并将 Jack 软件中建立的虚拟人体模型匹配到导入的除冰舱三维模型中,建立虚拟人-机-环境,如图 3 所示。由于被举升到空中的飞机除冰舱需灵巧轻量化,因此,通常采用轻便简易的固定式座椅。在后续的仿真分析时,可不考虑座椅前后、高低调整对人体可触范围及视野带来的影响。



图 3 飞机除冰舱仿真场景
Fig.3 Simulation scene of aircraft de-icing cabin

2.3 操作员使用关键动作设计

根据飞机除冰舱除冰作业流程,对操作员操作过程进行关键姿态提取。然后对这几个关键姿态进行人机仿真分析,见图 4。

2.4 除冰舱可达域分析

空间可达域分析的主要内容是操作员在除冰过

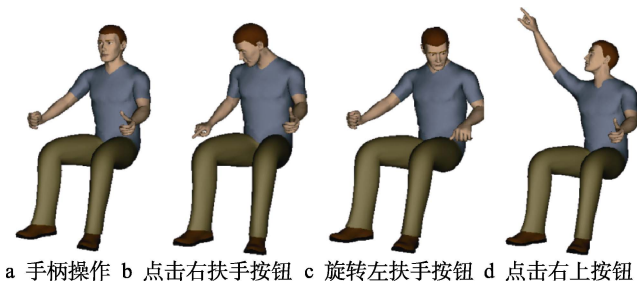


图 4 作业关键姿态
Fig.4 Key postures of operation

程中,需要操作的按钮、手柄是否均在操作员的双手可达域范围内,并且是否方便操作。在分析过程中,一般从肩膀到中指指尖为最大可达域范围。

Jack 软件中的 Reach Zones 工具可通过整个手臂的活动范围进行跟踪记录,得到绿色的球形包络数据,即操作员手部可达范围^[12]。在除冰过程中,操作员主要对两侧扶手台上的手柄与按钮,以及头顶右侧的按钮进行操作,如图 5 所示。

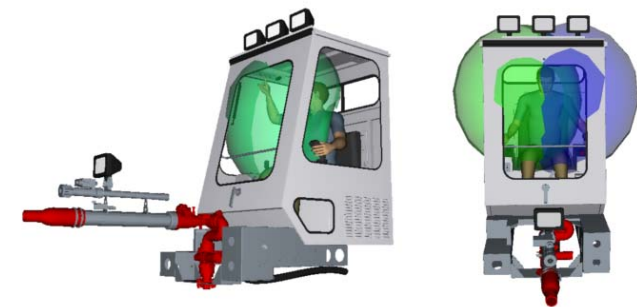


图 5 操作员可达域分析
Fig.5 Analysis of operator's reach zones

根据以上操作员手部可达域仿真分析可知,除冰舱内两侧扶手台上的操作手柄、按钮开关,以及顶部右侧的开关按钮均在手臂球面包络区域内,满足操作员的可达域需求。

2.5 除冰舱可视域分析

在除冰过程中,除冰舱需围绕飞机作业,工况十分复杂,稍有不慎,就会造成比较严重的安全事故,因此除冰舱的设计特别注重良好的操作视野,以防止在除冰过程中,碰撞或刮蹭到飞机外壳。

1) 虽然除冰舱一般都配备定位激光雷达等其他测距传感器,但是,良好的操作视野能给操作员实际的距离感。在 Jack 软件中,利用坐姿虚拟人体模型,躯干与腿部角度为 90°,视线向下 18°,左右摆头至头部摆动最大角度为±43.5°,观察四周视野,利用 Jack 软件的 Eye View 功能,得到操作员的视野结果,见图 6。结果显示操作员操作视野相对较好,能清楚地观察外部飞机的状态,但是前方 A 柱相对较粗,对操作员视野有一定的影响。



图 6 操作员视野分析
Fig.6 Analysis of operator's eye views

2) 操作员在进行除冰作业时, 除冰舱内的操作员需点击舱内的开关按钮。因此这些开关按钮不仅要排布在方便操作的可达域之内, 而且还需要能快速看清每个按钮的功能, 以免产生误操作。Jack 软件中的 View Cones 和 Eye View 功能可以输出操作员的视锥范围和第一视角画面。根据视锥参数设计要求, 距离 1 000 mm, 角度 30°以内的视锥范围, 操作员可以清晰识别操作开关上的文字图标^[4]。操作员点击开关按钮的视野, 如图 7 所示。结果表明, 手部在点击扶手台手柄前面的部分开关时, 被手柄遮挡, 需重新布置被遮挡的部分开关按钮。

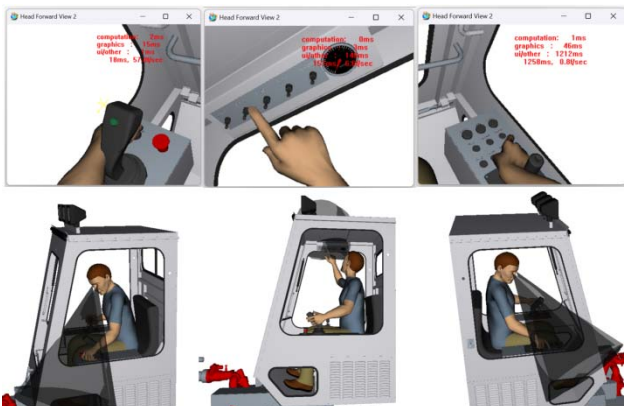


图 7 操作员可视域分析
Fig.7 Analysis of operator's view area

2.6 操纵姿态的舒适性分析

针对人体姿态分析, 可以对人的整体或局部姿态进行检查、评分和优化, 从而确定使用者在作业过程中人机交互的最佳使用情况, 并对其工效进行评定^[13]。通过对除冰舱作业流程的梳理与实际作业环境的调研可知, 除冰舱作业人员需长时间坐立, 双手操纵手柄, 控制除冰舱的行进位置, 以及喷枪头的方向与位置。因此, 主要对操作员坐立双手握手柄姿态进行舒适性分析。

2.6.1 操作员 Porter 舒适度分析

Poter 舒适度分析可以反应关节的合理弯曲度, 如图 8 所示, 黄色线段表示关节弯曲舒适度的最大和最小限定值, 0 位置表示典型值。在限定的范围内长条数据显示绿色, 超过黄色线段, 即超出最大限定值, 长条数据就会变黄, 越趋近于 0 位置的典型值, 舒适

度越高, 反之数值的绝对值越大, 则舒适度越低^[3]。结果表明, 左右上臂、左膝盖、右大腿、右小腿, 这 5 处的关节弯曲舒适度超出限定范围值, 需通过两侧扶手台人机尺寸的调整, 优化上臂弯曲度。

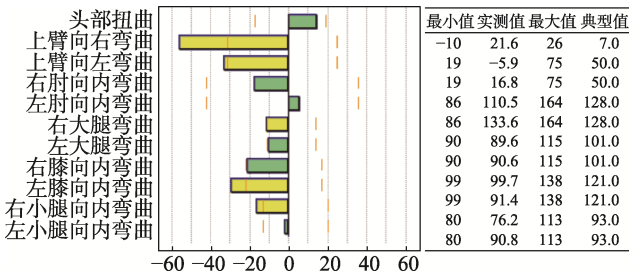


图 8 操作员 Poter 舒适度分析结果
Fig.8 Analysis results of Poter's comfort

2.6.2 操作员 Krist 舒适度分析

Krist 舒适度分析可以对不同身体部位的舒适度进行评级, 分数为 0~80, 分数越高表示舒适度评级越差^[14]。在飞机除冰舱人机工程设计时, 应尽可能减小操作员各部位的数值, 从而获得更好的舒适度。操作员 Krist 舒适度仿真分析结果如图 9 所示。综合舒适度为 80, 综合舒适度低。

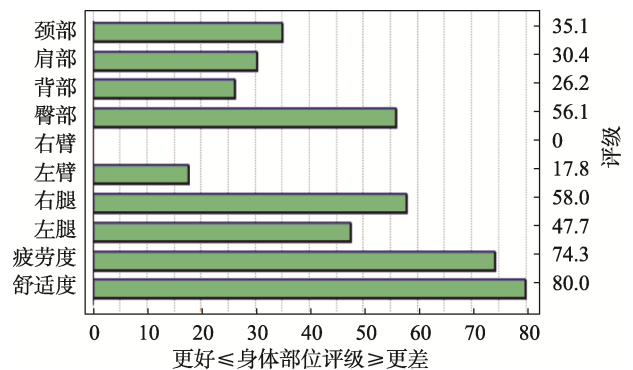


图 9 操作员 Krist 舒适度分析结果
Fig.9 Analysis results of Krist's comfort

2.6.3 静态强度预测分析

Jack 提供的静态强度预测 (Static Strength Prediction) 工具, 可以评估有多少比例的人可以保持这一身体部位的姿势进行工作^[3,15]。如图 10 所示, 操作

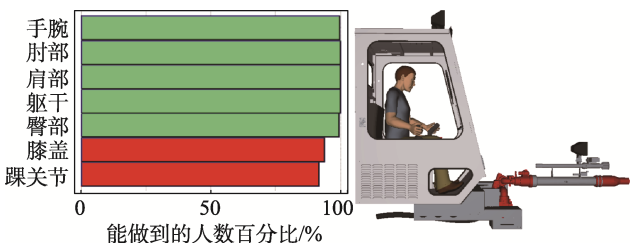


图 10 操作员静态强度预测分析结果
Fig.10 Analysis results of operator's static strength prediction

员在此种工作姿势下, 膝盖与踝关节能做到的人数明显未达到 100%, 需要优化除冰舱前部的空间尺寸设计, 让腿部获得更好的舒适度。

静态强度预测的所有图表分析结果, 提供了 23 项细化动作预测评估, 如图 11 所示。其中 16 项动作

100% 操作员可以完成, 有 7 项动作, 少部分人不能完成。不能完成的主要部位为膝盖与踝关节; 膝盖和踝关节转矩值较大, 达到 75~100 N·m; 躯干强度值超过 420 N·m。综合静态强度预测结果, 表明这几处身体部位的姿势需进行调整。

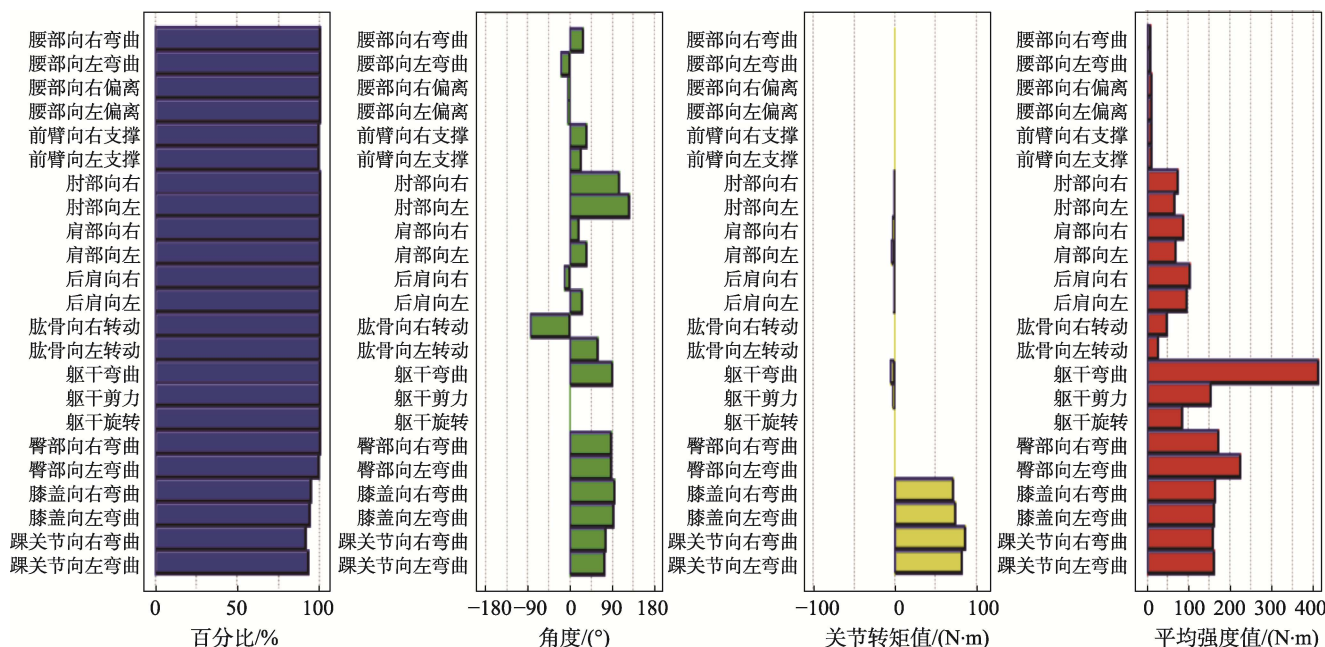


图 11 静态强度预测所有图表分析结果

Fig.11 Analysis results of all charts for static strength prediction

3 飞机除冰舱优化分析与设计

3.1 优化与建议

飞机除冰舱的人机工程仿真分析结果表明, 除冰、防冰作业时, 操作员观察飞机外部环境的视野, 常用操作开关按钮的可视性, 以及姿势舒适度, 需要进一步优化, 主要包括以下几个方面。

- 1) 对飞机除冰舱 A 柱以及透明玻璃区域进行优化, 扩大操作员作业时观察飞机的视野。
- 2) 通过重新调整操作手柄的位置, 减小上臂弯曲的角度。
- 3) 调整常用开关按钮的位置, 减小操作难度, 增加可视性。
- 4) 增加腿部空间, 舒缓膝盖与踝关节所受压力。

3.2 除冰舱优化设计

1) 舱体外形优化。在满足除冰舱整体刚性强度的前提下, 尽量减小 A 柱的宽度, 扩大玻璃区域的面积, 使操作员获得更好的视野。同时适当调整除冰舱前部的空间尺寸设计, 使操作员获得更大、更舒适的操作空间, 见图 12。

2) 两侧扶手台优化。将手柄位置往前移动, 将开关按钮向后排布, 可以解决部分按钮被遮挡的问题。同时按钮及图标视距更近, 可以看得更清晰, 降



图 12 优化前后的除冰舱外形

Fig.12 Comparison of the shape of the de-icing cabin before and after optimization

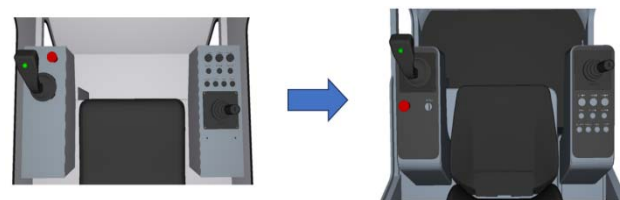


图 13 优化前后的除冰舱内扶手台

Fig.13 Comparison of the operating armrest of the de-icing cabin before and after optimization

低误操作风险。结合 Jack 舒适度工具, 在优化过程中发现, 扶手台的位置向后移动 20 mm, 扶手台部件安装面高度抬高 35 mm, 可以获得更舒适度的作业姿态。两侧扶手台优化前后的示意图如图 13 所示。

4 优化后的结果分析与校核

4.1 优化后的可视域分析

1) 优化后的除冰舱操作员视野,如图 14 所示。结果显示操作员具有良好的操作视野,能清晰地观察外部飞机的状态。相比原设计,减少了 A 柱带来的视觉遮挡。



图 14 操作员视野分析
Fig.14 Analysis of operator's eye views

2) 使用 Eye View、View Cones 工具,再次进行视域分析,如图 15 所示。结果表明,重新排布后的开关按钮均在操作员的可视范围内,清晰可见,且操作时不会被手柄遮挡。

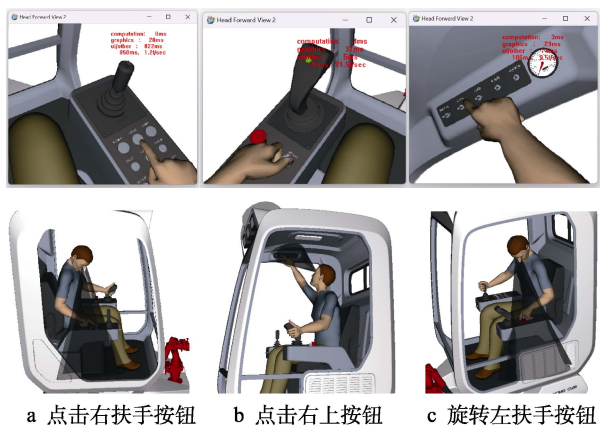


图 15 操作员可视域分析
Fig.15 Analysis of operator's view area

3) 在除冰液以及防冻液的喷洒过程中,操作员需要自上而下对飞机的结冰部位进行精准喷洒,因此操作员需要清楚地看到喷枪头的位置。在进行作业时,以可以观察到喷头的极限位置为准。Jack 软件的 Obscuration Zones 工具可输出障碍物遮挡的边界^[12]。利用该工具,将障碍物设置为前窗玻璃,即可得到前窗玻璃遮挡区域的边界,即操作员前方视野区域。喷头的极限位置和操作员前窗的可视区域边界,如图 16 所示。结果表明,喷头的极限位置都在操作员的前窗可视区域内,操作员能很好地观察到喷头的各个位置。

通过以上飞机除冰舱可视域仿真分析,表明操作员在优化后的除冰舱内,能够拥有更好的观察视野,

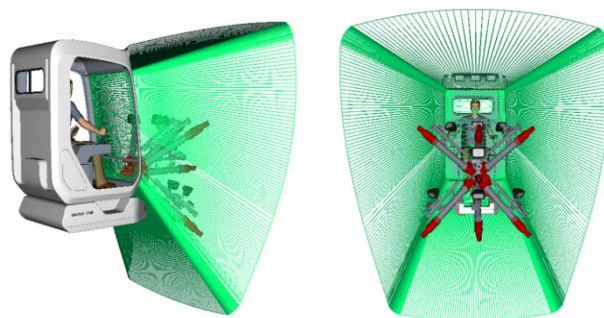


图 16 喷枪位置可视性分析
Fig.16 Analysis of spray gun position visibility

能最大范围看清除冰舱周围的环境,也可以完全观测到喷枪头的所有位置,同时舱内所有的开关按钮也在清晰的可视范围之内。因此,该优化后的除冰舱满足操作员人机工学可视域设计需求。

4.2 优化后的可达域分析

操作员手部可达域仿真分析,如图 17 所示。除冰舱内两侧扶手台上的操作手柄、按钮开关,以及顶部右侧的开关按钮均在手臂球面包络区域内,因此,优化后的除冰舱满足操作员的空间可达域人机尺寸设计需求。



图 17 操作员可达域分析
Fig.17 Analysis of operator's reach zones

4.3 优化后的作业姿态舒适性分析

4.3.1 操作员工作姿势分析

通过 Jack 中的 Ovako 工作姿势分析 (Ovako Working Posture Analysis) 工具,可以对操作员作业姿势进行分数评级,级别越小代表越舒适^[16]。仿真结果为 1,如图 18 所示。表明工作姿势看起来正常自然,肌肉骨骼系统的体位负荷是可以接受的,没有必要采取纠正措施。

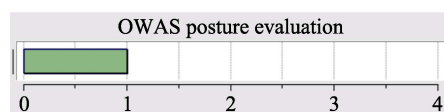


图 18 工作姿势分析
Fig.18 Analysis of working posture

4.3.2 操作员 Porter 舒适度分析

优化后的 Poter 舒适度分析结果, 如图 19 所示。结果表明, 除冰舱操作员的主要关节弯曲度都为绿色, 代表所有关节弯曲度都在限定弯曲舒适值之内。

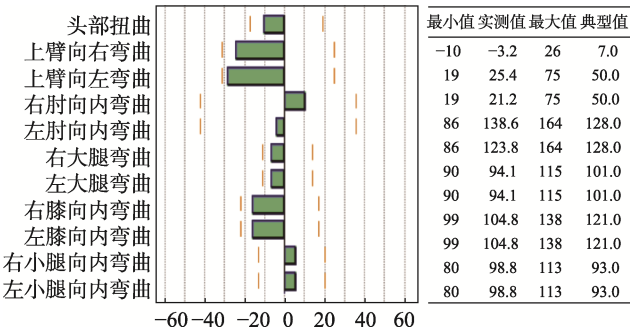


图 19 优化后的 Poter 舒适度分析结果
Fig.19 Analysis results of Poter's comfort after optimization

表 3 优化前后的 Porter 舒适度数值对比
Tab.3 Comparison of Porter's comfort values before and after optimization

项目	优化前	典型值	优化后
头部扭曲	21.6	7.0	-3.2
右肘向内弯曲	110.5	128.0	138.6
左肘向内弯曲	133.6	128.0	123.8
上臂向右弯曲	-5.9	50.0	25.4
上臂向左弯曲	16.8	50.0	21.2
左小腿向内弯曲	90.8	93.0	98.8
右小腿向内弯曲	76.2	93.0	98.8
右大腿弯曲	90.6	101.0	94.1
左大腿弯曲	89.6	101.0	94.1
左膝盖向内弯曲	91.4	121.0	104.8
右膝盖向内弯曲	99.7	121.0	104.8

对比优化前后的 Poter 舒适度数值, 如表 3 所示。优化后, 操作员上臂向右弯曲、上臂向左弯曲、左膝盖、右大腿向内弯曲值, 更趋向典型值, 其余关节弯曲舒适度值也得到改善。

4.3.3 操作员 Krist 舒适度分析

优化后的操作员 Krist 身体部位的舒适度仿真分析结果, 如图 20 所示。

对比优化前后的 Krist 舒适度数值, 如图 21 所示。优化后的身体各部位舒适度值降低, 操作员身体部位的舒适度有所提升。

4.3.4 优化后的静态强度预测分析

优化后操作员工作姿势的静态强度预测, 如图

22 所示。膝盖与踝关节动作能做到的人数百分比增加, 舒适度得到改善。

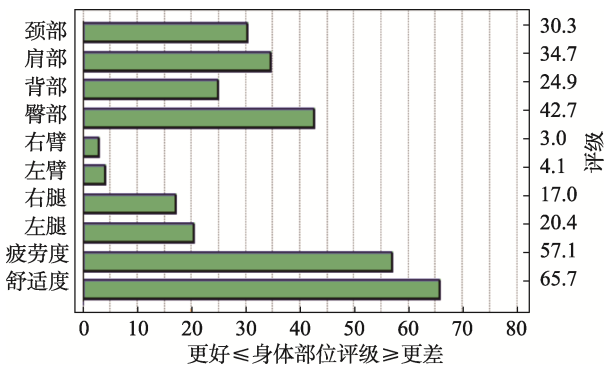


图 20 优化后的 Krist 舒适度分析结果
Fig.20 Analysis results of Krist's comfort after optimization

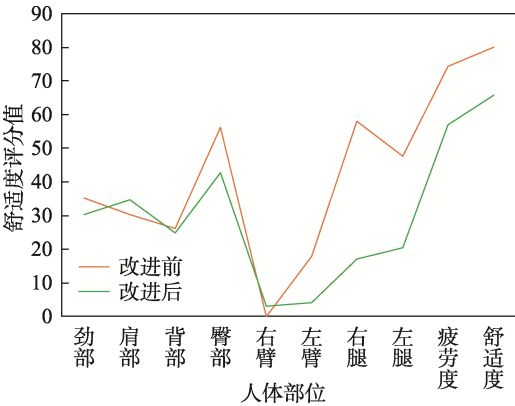


图 21 优化前后的 Krist 舒适度分析对比
Fig.21 Comparison of Krist's comfort analysis before and after optimization

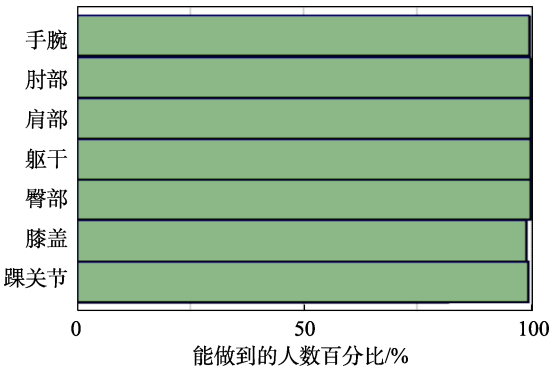


图 22 操作员静态强度预测分析结果
Fig.22 Analysis results of operator's static strength prediction

优化后的静态强度预测细项图表分析结果, 如图 23 所示。膝盖与踝关节转矩值有一定降低, 躯干强度值已减小到 360 N·m。表明腿部与躯干的压力得到缓解。

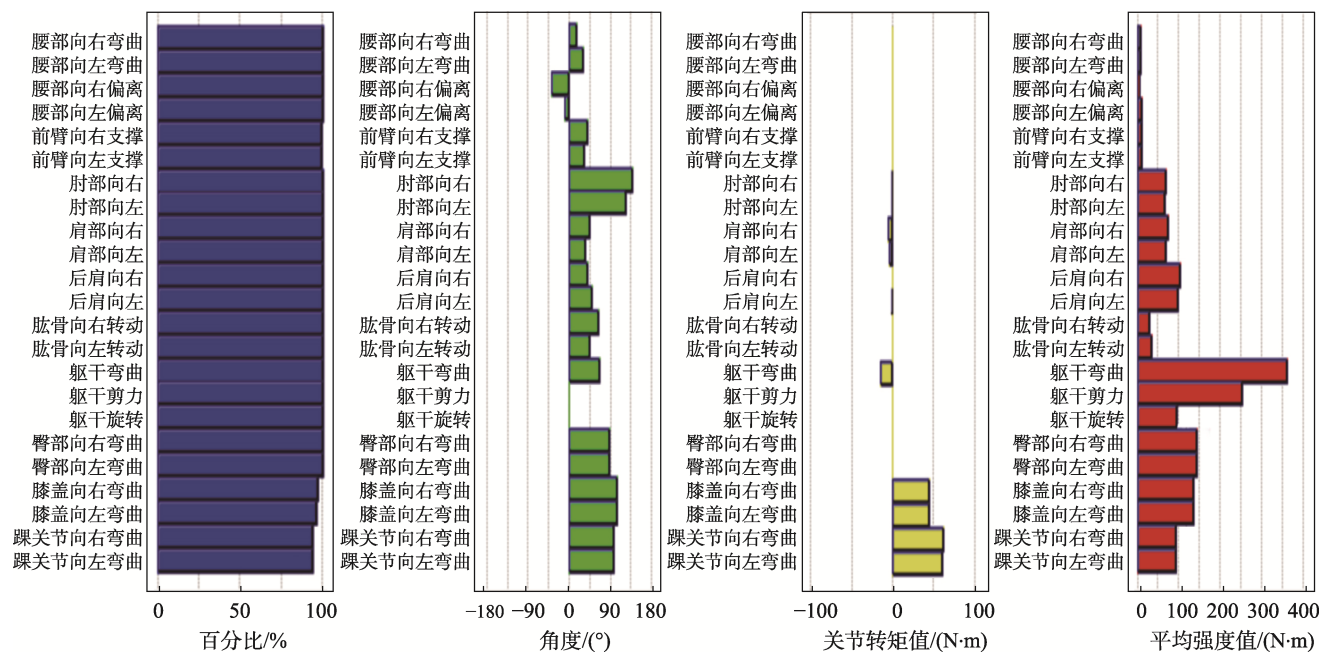


图 23 静态强度预测所有图表分析结果

Fig.23 Analysis results of all charts for static strength prediction

5 结论

使用 Jack 人机工程分析软件, 对飞机除冰舱除冰操作过程中喷枪位置、操作员可视域、常用操作手柄和开关按钮的可达性, 以及作业姿态的舒适度进行仿真分析, 并针对分析结果, 逐一对除冰舱的人机工程进行优化。结果表明, 操作员视野和舱内人机交互尺寸得到改善, 操作过程中的作业姿态舒适度得到明显提升, 证明了本文方法的合理性与有用性, 为同类型操作舱空间设计, 提供了人-机-环境设计验证参考。本文主要对操作员作业姿势的可视域、可达域、舒适度进行了深入的分析, 未来还可以对操作员进出舱姿态、头部空间舒适度等进行深入研究, 将虚拟仿真分析应用到更多的人机工程设计验证中。

参考文献:

- [1] 夏建满, 徐赫男. 飞机除冰车技术现状[J]. 专用汽车, 2010(2): 37-39.
XIA J M, XU H N. Technology Status of Airplane De-Ice Vehicle[J]. Special Purpose Vehicle, 2010(2): 37-39.
- [2] 叶爽利, 赵建东, 曹启升. 自行式飞机除冰车现状及发展趋势[J]. 建设机械技术与管理, 2021, 34(3): 80-82.
YE S L, ZHAO J D, CAO Q S. The Current Situation and Development Trend of Self Propelled Aircraft De-icing Vehicle[J]. Construction Machinery Technology & Management, 2021, 34(3): 80-82.
- [3] 周艾, 张建敏, 杨勤, 等. 基于 JACK 的工业搬运车驾
- 驶室人机工程仿真分析[J]. 机械设计, 2020, 37(1): 26-34.
- ZHOU A, ZHANG J M, YANG Q, et al. Ergonomic Simulation and Analysis of the Industrial Truck's Cab Based on JACK[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(1): 26-34.
- [4] 张芳燕, 刘国闯, 张磊, 等. 基于 Jack 的反铲式挖掘机驾驶室人机工程仿真分析与设计改进[J]. 机械设计, 2023, 40(6): 145-152.
- ZHANG F Y, LIU G C, ZHANG L, et al. Ergonomic Simulation Analysis and Improvement Design of Backhoe Excavator Cab Based on Jack[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(6): 145-152.
- [5] 陈登凯, 王瑶, 敖卿, 等. 基于 DELMIA 的民机内饰虚拟维修仿真与评价方法[J]. 包装工程, 2023, 44(14): 73-82.
- CHEN D K, WANG Y, AO Q, et al. Simulation and Evaluation Optimization Method of Civil Aircraft Interior Virtual Maintenance Based on DELMIA[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(14): 73-82.
- [6] 赵川, 余隋怀, 李炳超, 等. 虚拟仿真技术在叉车视野优化中的应用研究[J]. 图学学报, 2016, 37(5): 675-680.
- ZHAO C, YU S H, LI B C, et al. Using Virtual Computer Analysis to Optimize the Forklift Vision[J]. Journal of Graphics, 2016, 37(5): 675-680.
- [7] XUE H J, CHEN J Y, ZHANG X Y. A Task Simulation and Ergonomics Analysis Method Based on JACK[C]// International Conference on Human-Computer Interaction. Cham: Springer, 2020: 584-594.
- [8] 王建伟, 张建敏. 基于 Jack 的农机驾驶室人机工程学分析及仿真[J]. 农机化研究, 2018, 40(6): 246-251.

- WANG J W, ZHANG J M. Analysis and Simulation of Ergonomics of Agricultural Machinery Cab Based on Jack[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(6): 246-251.
- [9] POLÁŠEK P, BUREŠ M, ŠIMON M. Comparison of Digital Tools for Ergonomics in Practice[J]. Procedia Engineering, 2015, 100: 1277-1285.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 自行式飞机除冰防冰车功能要求: GB/T 23417—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Aerospace-Self-Propelled De-Icing/Anti-Icing Vehicles-Functional Requirements: GB/T 23417 — 2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [11] 国家技术监督局. 中国成年人人体尺寸: GB 10000—1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Human Dimensions of Chinese Adults: GB 10000—1988[S]. Beijing: Standards Press of China, 1988.
- [12] 边轩毅, 赵静, 李娟莉. WK-35 大型矿用挖掘机驾驶室人机工程改进设计[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(7): 92-98.
- BIAN X Y, ZHAO J, LI J L. Man-Machine Engineering Improvement Design of WK-35 Large Mining Excavator Cab[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(7): 92-98.
- [13] 姚湘, 刘俊, 毛建赟, 等. 空间站卫生间人机仿真评估与实践[J]. 包装工程, 2023, 44(4): 165-170.
- YAO X, LIU J, MAO J Y, et al. Evaluation and Practice of Human-Machine Simulation in Space Station Toilet[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(4): 165-170.
- [14] 刘力卓, 赵义格, 韩玉琪, 等. 基于 Jack 远程监控操作台人机工效评价[J]. 工业工程, 2019, 22(5): 25-31.
- LIU L Z, ZHAO Y G, HAN Y Q, et al. An Ergonomics Evaluation of Remote Monitoring Console Based on Jack[J]. Industrial Engineering Journal, 2019, 22(5): 25-31.
- [15] 李晓英, 谢逸飞. 基于 FMEA 与 Jack 的医用转移床虚拟仿真设计与研究[J]. 制造业自动化, 2023, 45(1): 195-200.
- LI X Y, XIE Y F. Design and Research of Virtual Simulation of Medical Transfer Bed Based on FMEA and Jack[J]. 制造业自动化, 2023, 45(1): 195-200.
- [16] ZHANG Y B, WU X, GAO J Q, et al. Simulation and Ergonomic Evaluation of Welders' Standing Posture Using Jack Software[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(22): 4354.
- (上接第 48 页)
- [28] VORM E S, COMBS D J Y. Integrating Transparency, Trust, and Acceptance: The Intelligent Systems Technology Acceptance Model (ISTAM)[J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 2022, 38(18/19/20): 1828-1845.
- [29] SELKOWITZ A R, LARIOS C A, LAKHMANI S G, et al. Displaying Information to Support Transparency for Autonomous Platforms[C]// Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems. Cham: Springer, 2017: 161-173.
- [30] MILLER C A. Trust, Transparency, Explanation, and Planning: Why We Need a Lifecycle Perspective on Human-automation Interaction[M]. New York: Academic Press, 2021: 233-257.
- [31] VERED M, HOWE P, MILLER T, et al. Demand-Driven Transparency for Monitoring Intelligent Agents[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2020, 50(3): 264-275.
- [32] ZANG J, JEON M. The Effects of Transparency and Reliability of In-Vehicle Intelligent Agents on Driver Perception, Takeover Performance, Workload and Situation Awareness in Conditionally Automated Vehicles[J]. Multimodal Technologies and Interaction, 2022, 6(9): 82.
- [33] KUNZE A, SUMMERSKILL S J, MARSHALL R, et al. Augmented Reality Displays for Communicating Uncertainty Information in Automated Driving[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. Toronto, ON, Canada. ACM, 2018: 164-175.
- [34] BELLER J, HEESEN M, VOLLRATH M. Improving the Driver-Automation Interaction: An Approach Using Automation Uncertainty[J]. Human Factors, 2013, 55(6): 1130-1141.
- [35] HELLDIN T, FALKMAN G, RIVEIRO M, et al. Presenting System Uncertainty in Automotive UIs for Supporting Trust Calibration in Autonomous Driving[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. Eindhoven, Netherlands. ACM, 2013: 210-217.
- [36] 王建民, 汪巧凤, 张俊. 自动驾驶中基于透明度的人机界面设计研究[J]. 包装工程, 2023, 44(14): 152-161.
- WANG J M, WANG Q F, ZHANG J. Human-Machine Interface Design Based on Transparency in Autonomous Driving Scenes[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(14): 152-161.