

基于层次分析的航空燃油供应系统清洗 作业车造型设计研究

徐江华^{1,2}, 李子坤¹

(1.上海工程技术大学, 上海 201620; 2.同济大学 上海国际设计创新研究院, 上海 200092)

摘要: **目的** 为解决因车辆作业人员作业负荷大、频繁重复的不良作业姿势, 所导致的作业人员患肌肉骨骼疾病的概率逐年增高的问题, 对航空燃油供应系统清洗作业车进行人机设计研究。**方法** 利用层次分析法计算作业人员在作业过程中产生不舒适行为的综合权重值并排序, 经过实地调研与分析, 获取车辆现有问题与作业人员身体负荷情况, 结合虚拟仿真软件对问题进行真实性验证。根据验证结果, 对车辆进行造型设计优化, 并对设计方案进行合理性验证。**结果** 作业人员在优化后的车辆进行作业时, 其作业舒适性得到明显改善。**结论** 优化了车辆的使用方式及作业空间布局, 将作业空间划分为三个等级空间: 第一等级空间距离地面 790~1 090 mm, 第二等级空间位于距离地面 1 090~1 490 mm, 第三等级空间位于距离地面 1 490 mm~1 830 mm, 其中作业人员的最佳作业操作区域位于第二等级空间; 此外将储存空间与风机箱相结合, 使用滑轨结构横向打开储存空间, 可以有效降低作业人员的作业负荷。

关键词: 航空燃油供应系统清洗作业车; 人机设计; 层次分析法; 造型设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)06-0420-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.06.048

Modeling Design of Cleaning Operation Vehicle of Aviation Fuel Supply System Based on AHP

XU Jiang-hua^{1,2}, LI Zi-kun¹

(1.Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2.Shanghai International Institute of Design and Innovation, Tongji University, Shanghai 200092, China)

ABSTRACT: The work aims to study the human-machine design of cleaning vehicles for the aviation fuel supply system to solve the problem that the musculoskeletal diseases of vehicle operators are increasing year by year due to the heavy workload and frequent repetition of bad working posture of vehicle operators. The comprehensive weight values of the uncomfortable behaviors of the operators during the operation were calculated and ranked through the analytic hierarchy process. After field investigation and analysis, the existing problems of the vehicle and the physical load of the operators were obtained, and the authenticity of the problems was verified through the virtual simulation software. According to the verification results, the vehicle modeling design was optimized, and the rationality of the design scheme was verified. The operating comfort of operators was significantly improved when they were working in the optimized vehicle. The use mode of vehicles and the layout of work space are optimized, and the work space is divided into three levels: the first level space is 790-1 090 mm from the ground, the second level space is 1 090-1 490 mm from the ground, and the third level space is 1 490 mm-1 830 mm from the ground, in which the best operation area for operators is located in the second level space. In addition, combining the storage space with the fan box and opening the storage space horizontally through the slide rail structure can effectively reduce the workload of operators.

KEY WORDS: aviation fuel supply system cleaning operation vehicle; human-machine design; analytic hierarchy process; modeling design

收稿日期: 2022-10-27

基金项目: 上海工程技术大学博士单位培育-艺术学院硕博学科支撑项目

作者简介: 徐江华(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事航空装备设计与飞机客舱舒适性设计研究。

图 2 清洗作业车人机设计 Citespace 数据图谱
Fig.2 Citespace data atlas of human-machine design of cleaning operation vehicle

张瑞秋等^[5]认为作业人员作业姿势不符合人机工程学、长时间进行重复作业以及不合理的肌肉骨骼受力负荷是导致作业人员出现身体不适以及患肌肉骨骼疾病的最重要的原因。Anandakumar 等^[6]认为人机工程学是人、机、环三个要素之间相互作用的学科。舒适的作业空间可以降低肌肉骨骼疾病的可能性,提升作业人员的作业效率。Shafti 等^[7]认为肌肉骨骼疾病是由于作业姿势与作业环境不适导致的。刘琴等^[8]认为除作业姿势不合理的因素外,影响作业人员健康状况的因素还有工作环境。刘小霞等^[9]认为车辆器材布局设计直接影响作业人员的作业效率和身体健康。张丽珍等^[10]认为作业空间布局的人机工效学设计决定了作业人员的作业姿势,作业空间布局的不合理使作业人员长期保持不舒适的作业姿势,从而直接影响作业人员的作业效率,同时导致肌肉骨骼疾病的产生。郭红领等^[11]认为作业人员存在不合理的作业姿势、长期重复同一劳动动作容易诱发职业性肌肉骨骼疾病 (Work-related Musculoskeletal Disorders, WMSDs),是导致作业人员产生不舒适的重要原因。金书香等^[12]认为作业人员长期存在的低头、弯腰、手抬高过肩及头部、长时间保持站立姿势作业、工作时间长等因素是导致作业人员发生慢性肌肉骨骼损伤的重要因素。Taki 等^[13]认为作业人员在执行作业任务时,不当的作业姿势会造成身体负担。针对作业系统的设计,要有合理的操作程序规划,以便减轻作业人员的作业负担。

现阶段,在清洗作业车造型设计过程中,主要参考中国民用航空局颁布的 MH/T 6122-2020 设计准则,相对于民用机场特种车辆快速发展的今天,在满足车辆设计标准的同时,更要注重其人机舒适性,因此有必要对现有清洗作业车造型进行人机设计与优化。

2 清洗作业车人机舒适性设计流程

2.1 人机舒适性设计因素分析

清洗作业车人机舒适性因素主要包含人机舒适性的生理因素、心理因素与环境因素。车辆的作业空间、作业方式、作业器具尺寸、作业姿势、作业时长、作业环境等多方面的不舒适因素,都会导致作业人员产生不舒适感。因此,清洗作业车造型设计不仅要满足重要性因素、使用频率因素、功能因素、安全性因素,更要充分考虑以人为本的因素^[14]。

1) 重要性因素。重要性因素是指考虑清洗作业车清洗设备的紧急重要性,例如发生紧急情况时应立即放置救援三脚架,救援三脚架的位置应设计在车辆较为容易取出且较为明显的位置。

2) 使用频率因素。使用频率因素是指将清洗作业车常用的清洗设备储存于舒适、易拿取的位置空

间,降低因重复不良作业姿势导致的作业人员身体负荷。

3) 功能因素。将清洗作业车具有相似功能的清洗工具存储于同一空间,增加空间利用率,使车辆空间利用率更高。清洗作业车在清洗作业中,存在使用清洗设备的先后关联顺序,因此应该将清洗设备按使用顺序进行排列。

4) 安全性因素。安全性原则是指在清洗作业车作业过程中保证作业安全、人员安全,使车辆各项指标数据符合行业标准^[15]。

5) 以人为本的因素。即作业人员在操作过程中的心理、生理因素。作业人员在作业时肢体运动路线最短、最舒适、效率和准确性最高的范围空间称之为最佳作业空间范围^[16]。清洗作业车的清洗设备造型设计在符合行业标准的前提下,清洗设备既要满足人的手持尺寸,还要分别将其设置在舒适、合理的空间范围内。

2.2 不舒适要素 AHP (层次分析法) 筛选

2.2.1 建立目标层层次分析结构

对清洗作业车作业人员在作业过程中的不舒适因素进行定量化分析,筛选出较为主要的影响因素,从而进行造型优化设计。将清洗作业车的造型设计通过层次分析法构建层析结构,将目标层用 A 表示;准则层为清洗作业车设计方案所要遵循的设计准则,用 B_i ($i=1,2,3$) 表示,方案层用 B_{ij} 表示,如图 3。

2.2.2 各影响因素对应的判断矩阵与排序

由于清洗作业车用户人群较为特殊,为保证判断矩阵的客观性,由清洗作业车作业人员、车辆结构工程师以及设计学类专业老师共计 10 人组成专家小组 (其中清洗作业车作业人员 6 人、车辆结构工程师 2 人、设计学类专业老师 2 人),采用 1-9 标度法对层次结构模型中的各种因素进行层级分析,并构建判断矩阵见表 1—6。利用 Yaahp 层次分析软件计算综合权重值,结果见表 7,评价结果均通过一致性检验。

为了确定其排序结果的真实性,对 CF5063TQX 清洗作业车工程师和车辆作业人员进行调研访谈,根据调研访谈结果可知,目前的清洗作业车存在以下几点设计缺陷:

1) 车辆作业空间布局不合理。作业车辆在行驶过程中出现不平衡现象,容易引发车辆侧翻等安全事故。其中作业人员在使用应急风机和救援三脚架时需要频繁进行弯腰、下蹲等不良的作业姿势,作业人员在作业结束后常出现腰部酸痛等状况。

2) 车辆作业空间尺寸设计不合理。如清洗工具体积较小且占地面积小,其储存空间设计过大,导致整体车辆空间利用率低,使作业人员作业效率降低,工作时间延长。

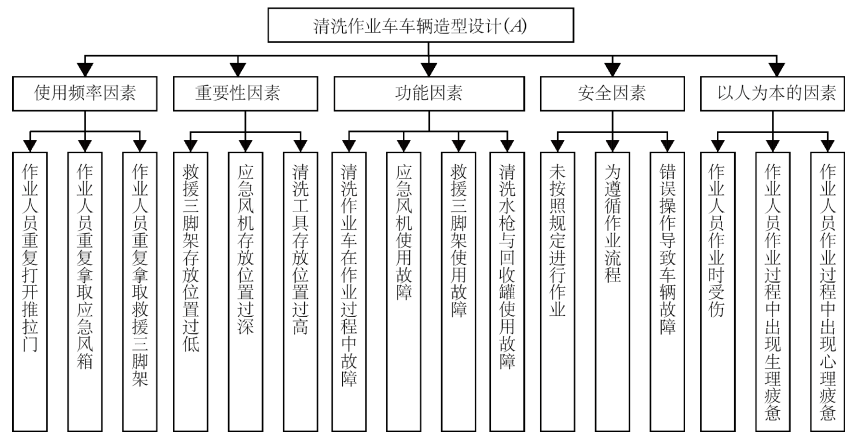


图 3 各因素层级分析
Fig.3 Hierarchical analysis of various factors

表 1 目标层判断矩阵计算结果
Tab.1 Calculation results of target layer judgment matrix

项目	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	权重
B_1	1	1/2	3	1/3	3	0.173 8
B_2	2	1	5	3	4	0.412 4
B_3	1/3	1/5	1	1/3	1/3	0.059 1
B_4	1/3	3	3	1	3	0.257 7
B_5	1/3	1/4	3	1/3	1	0.097 0

表 2 B_1 层判断矩阵计算结果
Tab.2 Calculation results of B_1 layer judgment matrixs

项目	B_{11}	B_{12}	B_{13}	权重
B_{11}	1	7	6	0.130 4
B_{12}	1/7	1	1/3	0.013 6
B_{13}	1/6	3	1	0.029 8

表 3 B_2 层判断矩阵计算结果
Tab.3 Calculation results of B_2 layer judgment matrix

项目	B_{21}	B_{22}	B_{23}	权重
B_{21}	1	3	7	0.267 7
B_{22}	1/3	1	5	0.115 0
B_{23}	1/7	1/5	1	0.029 7

表 4 B_3 层判断矩阵计算结果
Tab.4 Calculation results of B_3 layer judgment matrix

项目	B_{31}	B_{32}	B_{33}	B_{34}	权重
B_{31}	1	1/5	1/3	3	0.007 7
B_{32}	5	1	2	5	0.029 9
B_{33}	3	1/2	1	4	0.017 4
B_{34}	1/3	1/5	1/4	1	0.004 1

表 5 B_4 层判断矩阵计算结果
Tab.5 Calculation results of B_4 layer judgment matrix

项目	B_{41}	B_{42}	B_{43}	权重
B_{41}	1	2	1	0.099 8
B_{42}	1/2	1	1/3	0.043 6
B_{43}	1	3	1	0.114 3

表 6 B_5 层判断矩阵计算结果
Tab.6 Calculation results of B_5 layer judgment matrix

项目	B_{51}	B_{52}	B_{53}	权重
B_{51}	1	3	3	0.057 6
B_{52}	1/3	1	1/2	0.015 2
B_{53}	1/3	2	1	0.024 2

3) 车辆使用方式不合理。作业人员需要长期重复进行抬手、搬运等作业动作，在作业结束后，作业人员常出现背部、肩部酸痛等状况。

因此，有必要对清洗作业车进行进一步的人机分析与造型设计优化。

2.3 不舒适要素仿真验证

为保证实验数据样本具有多样化的特征，选取 30 名清洗作业车作业人员作为被测人员进行数据测量，为使实验数据最接近真实状况，将被测人员按身高平均分为五组，虚拟数字人身体尺寸数据选取五组数据的平均值，以满足大部分作业人员的操作要求^[17]，见表 8。以身高 1 760 mm、上臂 268 mm、下臂 256 mm、大腿 454 mm、小腿 512 mm、肩部到地面 1 490 mm 的数据进行模拟数字人的建立。

利用 Siemens Jack 虚拟仿真软件，对清洗作业车作业人员的作业流程进行仿真模拟。通过 Ovako Working Posture Analysis 分析、ForceSolver 受力分析与静态强度预测分析，可知“作业人员重复打开推拉门”“应急风机存放位置过深”“救援三脚架存放位置过低”三种作业行为对作业人员产生了身体不适的影响，其中“作业人员重复打开推拉门”这一作业姿势，虽然对人体肌肉骨骼造成的负荷压力不大，但作业人员长期存在重复性的抬手动作，对作业人员身体肌肉骨骼会造成一定的影响。仿真结果见图 4—7。

1) “作业人员重复打开推拉门”(作业姿势一)。此作业姿势除左手手腕部分压力较大外，没有明显的受力负荷现象，作业人员可长期保持此姿势进行作业。当作业人员进行站立作业时，对身体肌肉骨骼的

表 7 各因素权重值
Tab.7 Weight value of each element

准则层要素及权重	决策层要素	要素权重	综合权重	综合排名
使用频率因素 (B_1) 0.173 8	作业人员重复打开推拉门 (B_{11})	0.130 4	0.060 8	6
	作业人员重复拿起应急风机 (B_{12})	0.013 6	0.037 5	9
	作业人员重复拿起救援三脚架 (B_{13})	0.029 8	0.040 7	8
重要性因素 (B_2) 0.412 4	救援三脚架存放位置过低 (B_{21})	0.267 7	0.136 0	1
	应急风机存放位置过深 (B_{22})	0.115 0	0.105 5	2
	清洗工具存放位置过高 (B_{23})	0.029 7	0.088 4	3
功能因素 (B_3) 0.059 1	清洗作业车在作业过程中故障 (B_{31})	0.007 7	0.013 4	15
	应急风机使用故障 (B_{32})	0.029 9	0.017 8	11
	救援三脚架使用故障 (B_{33})	0.017 4	0.015 3	13
	清洗水枪与回收罐使用故障 (B_{34})	0.004 1	0.012 6	16
安全因素 (B_4) 0.257 7	未按照规定进行作业 (B_{41})	0.099 8	0.071 5	4
	未遵循作业流程 (B_{42})	0.043 6	0.060 3	7
	错误操作导致车辆故障 (B_{43})	0.114 3	0.074 4	5
以人为本的因素 (B_5) 0.097 0	作业人员作业时受伤 (B_{51})	0.057 6	0.030 9	10
	作业人员作业过程中出现生理疲惫 (B_{52})	0.015 2	0.014 6	14
	作业人员作业过程中出现心理疲惫 (B_{53})	0.024 2	0.016 4	12

表 8 被测人员部分身体尺寸数据
Tab.8 Body size of operators

序号	身高 /mm	体重 /kg	上臂长 /mm	下臂长 /mm	大腿长 /mm	小腿长 /mm
1	1 760	68	280	270	530	500
2	1 720	75	250	260	400	490
3	1 750	80	290	250	450	510
4	1 800	103	260	260	400	550
5	1 750	73	260	240	490	510

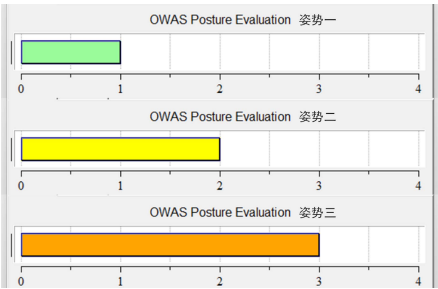


图 4 OWAS 作业姿势分析结果
Fig.4 Analysis results of OWAS operation posture

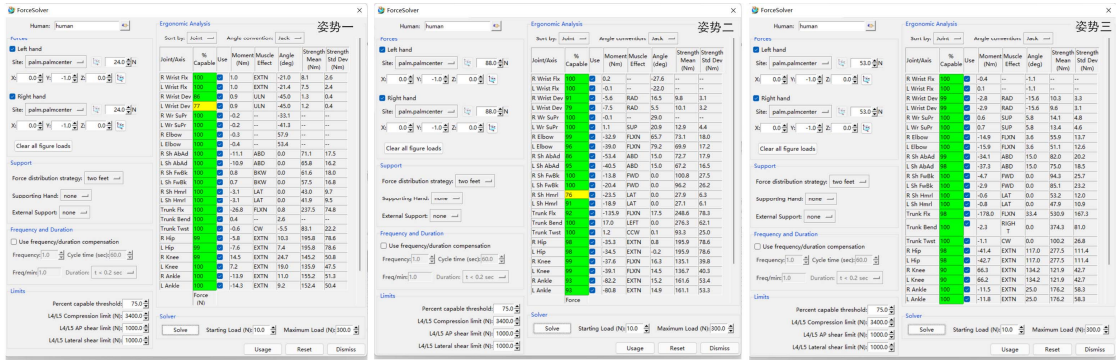


图 5 ForceSolver 受力分析
Fig.5 Force analysis of ForceSolver

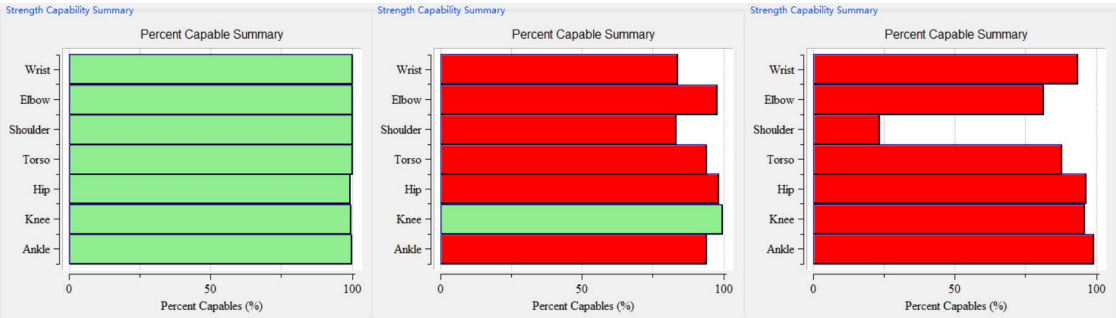


图 6 静态强度预测分析结果一
Fig.6 Static strength prediction analysis result I

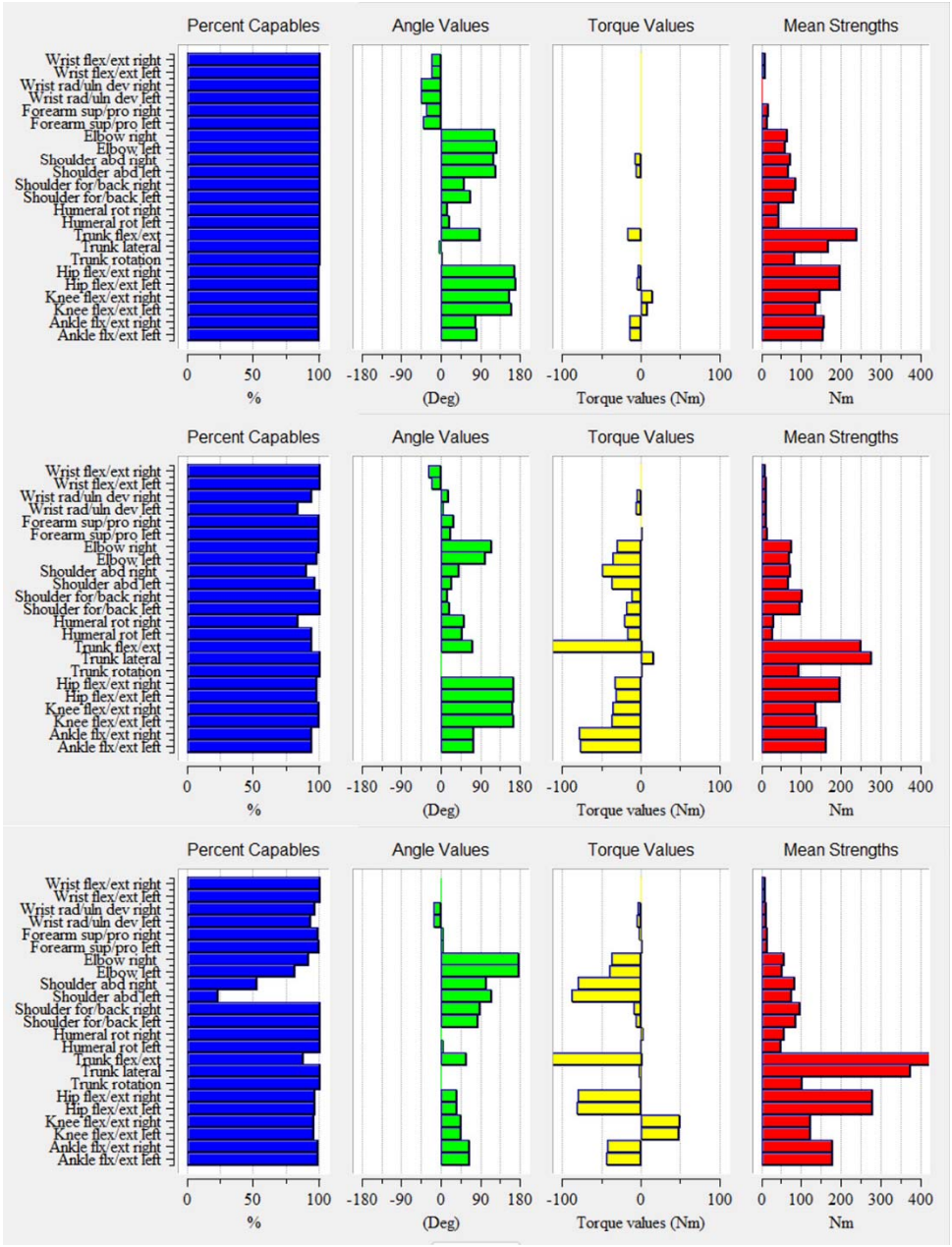


图 7 静态强度预测图表结果一
Fig.7 Static strength prediction chart result I

负荷影响程度较低，这一作业姿势可以做到的人数百分比比较高。如图 7 的分析结果所示，Angle Values（角度值，绿色图表）在正常范围内；Torque Values（转矩值，黄色图表）在正常范围内；Mean Strengths（平均强度）中的最大值为躯干弯曲值，超过 200 N，但不超过 250 N，表明身体部位在这种姿势下处于相对健康的状态。

2) “应急风机存放位置过深”（作业姿势二）。在此姿势下进行作业对作业人员身体产生显著不良影响，长时间身体前倾搬运应急风机对作业人员肌肉骨骼负荷程度较高，同时肩关节成为最重要的限制因素。这一作业姿势可以做到的人数百分比比较低，腰部关节、肩部关节产生受力负荷。如图 7 分析所示，

Angle Values（角度值）在正常范围内；Torque Values（转矩值）显示躯干弯曲数值超过 100 N；Mean Strengths（平均强度）中躯干弯曲值与躯干剪力值超过 250 N，表明身体部位在这种姿势下处于一种不健康状态。

3) “救援三脚架存放位置过低”（作业姿势三）。在此姿势下进行作业对作业人员身体产生了严重不良影响，长期保持此姿势作业会对作业人员造成严重危害。此姿势下能做到的人数百分比极低。如图 7 所示，在该作业姿势下，Angle Values（角度值）显示肘部向左和向右的力超出 100 N；Torque Values（转矩值）显示躯干弯曲数值超过 100 N；Mean Strengths（平均强度）中躯干弯曲值超过 400 N，表明身体部

位在这种姿势下处于一种极度不健康状态。

结合前文各因素重要性排序，确定“作业人员重复打开推拉门”“应急风机存放位置过深”“救援三角架存放位置过低”为车辆最需要改进优化的因素。

3 清洗作业车造型优化设计

3.1 使用方式的人机设计优化

“作业人员重复打开推拉门”这一作业动作主要为作业人员向上打开车辆储存空间推拉门，原车辆推拉门完全打开高度距离地面 1 875 mm，作业人员肩部抬高角度在 140°左右。根据人机工程学中重要关节最大活动范围与舒适活动范围的标准可知，肩部抬手动作最佳活动范围为 40°~90°^[18]见表 8，利用人体各部位尺寸数据与身高对应的一元线性方程计算出作业人员最舒适的抬手高度区间，回归方程如下：

$$X = Y - (Z \times \cos 40^\circ / Z \times \cos 90^\circ)$$

(1)

表 9 重要关节最大活动范围与舒适活动范围
Tab.9 maximum range of motion and comfortable range of motion of important joints

身体部位	关节	活动	最大角度/(°)	最大范围/(°)	舒适调节范围/(°)
上臂至躯干	肩关节（锁骨）	外摆，内摆	180，-30	210	0
		上摆，下摆	180，-45	225	（15~35）
		前摆，后摆	140，-40	180	40~90

为了避免作业人员在使用应急风机时产生弯腰或不自然的身体姿势，在应急风机与储存空间结合的区域设置滑动滑轨，对钣金件与风机箱进行一体化设计，使作业人员在打开储存空间的同时，可以将应急风机一同带出，从而减少作业人员的操作流程。此优化设计符合动作重构、合并原则，即将可能同时进行的作业动作进行合并，不仅可以减小作业人员的身体负荷，还能在一定程度上提高作业效率。对于原清洗作业车，需要作业人员俯身弯腰，才能将应急风机从车辆储存空间中搬出。其作业动作持续时长为 7~9 s，改善后的车辆经测试可知，其作业动作持续时长为 2~3 s。作业效率计算公式如下：

作业效率=（标准作业时间÷实际作业时间）×100% (2)

式中，标准作业时间没有明确规定，将标准作业时间设为 X，原车辆“取出应急风机”作业效率为 14X%~11X%，改进后的清洗作业车作业效率为 50X%~33X%，其作业效率提升了 36%~22%。

3.2 作业空间布局的人机设计优化

对当前清洗作业车救援三角架储存空间距离地面的高度进行测量，测量结果为 320 mm。为避免因“救援三角架存放位置过低”导致作业人员在作业时身体产生负荷，故对现有清洗作业车罐体作业空间布局进行设计优化。

遵循清洗作业车设计的重要性原则，车辆第一作

式中，X 为作业人员最舒适的抬手高度（mm），Y 为肩部到地面的距离（mm），Z 为作业人员的手臂长度（mm）。

Y 与 Z 的数据为表 9 中作业人员身体尺寸数据的平均值，得出作业人员最佳抬手高度为 1 090~1 490 mm，车辆作业储存空间开门把手距离地面应在此区域内。遵循人机工程学中的动作经济原则，在作业配置原则中水平移动是移动物体的最佳方式，应尽量避免垂直移动，垂直移动增加了作业人员的疲劳感，降低了操作效率^[19]。因此，对清洗作业车作业储存空间使用方式进行设计优化，采用滑轨结构进行设计；在车辆罐体储存空间两侧设置滑轨，作业人员通过内凹把手将储存空间横向拉出；滑轨结构可以减少设备的摩擦系数，从而减小作业人员的水平拉力值；同时在额定承重条件下，滑轨结构没有明显的摩擦与卡塞现象，对车辆的使用效果与钣金的消耗寿命有着重要的保护作用。

业空间应放置最重要、质量大且紧急的工具装备，在保证车辆行驶稳定的同时提高作业效率，将其高度调整为距离地面 790~1 090 mm；第二作业空间放置常用的清洗工具，第二作业空间处于作业人员肩部及背部关节最舒适的作业区域，将其高度调整为距离地面 1 090~1 490 mm；第三作业空间放置不常用且体积较小、质量较小的清洗工具，以免作业人员在拿取时对身体造成负荷，将其高度调整为距离地面 1 490~1 830 mm；取消第四储存空间，第四作业空间的位置不符合人机工程学的要求，在此空间进行作业会对作业人员的身体产生严重负荷，作业空间布局分布见图 8。

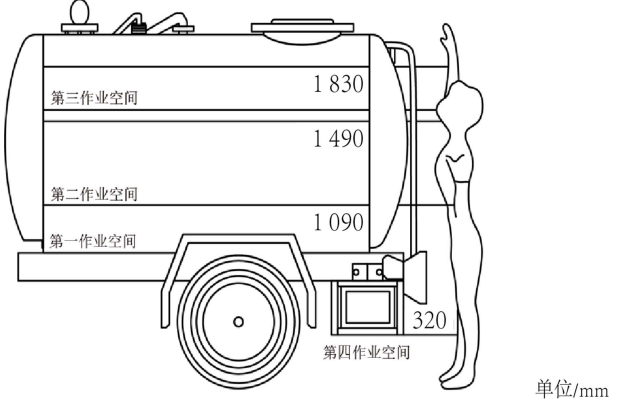


图 8 罐体储存空间分布图
Fig.8 Tank storage space distribution

3.3 CF5063TQX 航空燃油供应系统清洗作业车造型设计实践

基于前文的研究，对 CF5063TQX 航空燃油供应系统清洗作业车进行优化设计，见图 9。CF5063TQX 航空燃油供应系统清洗作业车是由上海承飞航空特种设备有限公司设计生产的新型清洗作业车，此款清洗作业车可实现对加油栓和加油阀的清洗，以及对清洗后的地井、加油栓和加油阀的及时干燥，同时还可以排除地井内的有毒有害气体。

1) 舒适性的人机优化设计。清洗作业车内部清洗工具分区合理，尺寸符合作业人员头部和眼睛转动角度的最佳范围。减少作业人员因拿取清洗工具时反复的抬头低头动作，从而减轻作业人员的颈部疲劳，同时有利于作业人员找寻关联性较高的清洗工具。

2) 外观形态的人机优化设计。内凹把手的造型

设计增加了产品的美观程度，最常用的清洗工具存放于距离地面 1 250 mm 处，开门把手抬升的高度符合作业人员手臂自然下垂到抬升的最佳角度，其距离地面的高度为 1 090 mm。整车最高把手位置距离地面的高度为 1 800 mm，车辆罐体的长×宽×高尺寸为 2 450 mm×2 100 mm×1 300 mm，相较于原本的罐体长度减少了 250 mm，符合作业人员平均身高尺寸抬手高度的限度范围，缩短罐体的尺寸也有利于增加车辆的灵活性。

3) 生产成本的人机优化设计。罐体两侧的钣金结构将罐体后方全部包裹，减少了工艺成本。

4) 空间布局的人机优化设计。改变传统清洗作业车的作业空间布局，如水箱放置于车辆一侧，容易导致车辆出现不平衡的现象。在该方案的空间布局设计中，将水箱对称分布在车辆储存空间的两侧，增加车辆在行驶过程中的平衡稳定性。



图 9 优化设计方案
Fig.9 Optimized design scheme

3.4 优化仿真结果对比

将最终方案重新带入 Jack 软件中进行 OWAS、ForceSolver 与静态强度预测分析,以判断其设计方案的合理性。

OWAS 分析结果:作业人员的作业姿势舒适度如图 10 所示,作业人员作业姿势一评价级别不变、作业姿势二评价级别由 2 改善为 1、作业姿势三评价级别由 3 改善为 1。

ForceSolver 分析结果:作业人员作业姿势受力分析如图 11 所示,与前文数据相比较,各关节受力负荷程度均有不同程度的降低,其中作业姿势三改善最为明显。

静态强度预测分析结果见图 12—13:

1) 作业姿势一结果显示:各关节部位均未有受

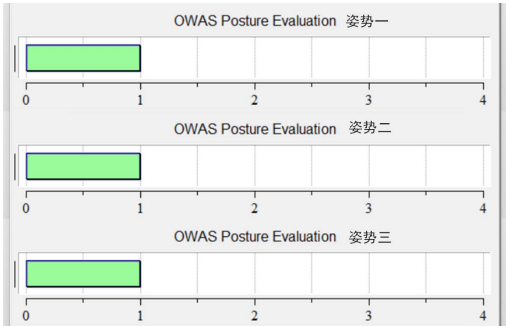


图 10 OWAS 作业姿势分析结果
Fig.10 analysis results of OWAS operation posture

力负荷现象。如图 13 所示: Angle Values (角度值) 均处于正常范围内; Torque Values (转矩值) 均处于正常范围内; Mean Strengths (平均强度) 均处于正

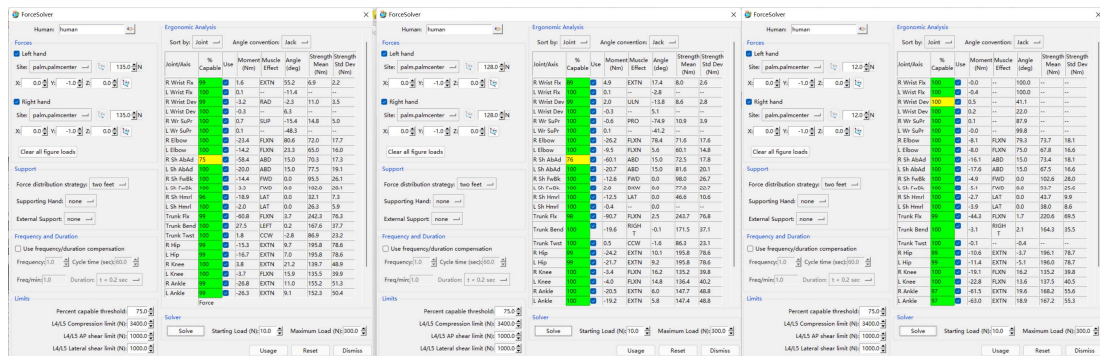


图 11 ForceSolver 分析结果
Fig.11 Forcesolver analysis results

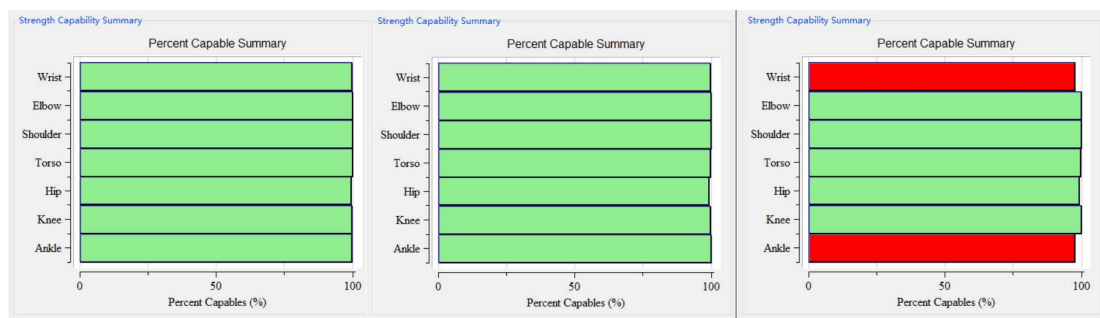


图 12 静态强度预测分析结果二
Fig.12 Static strength prediction analysis result II

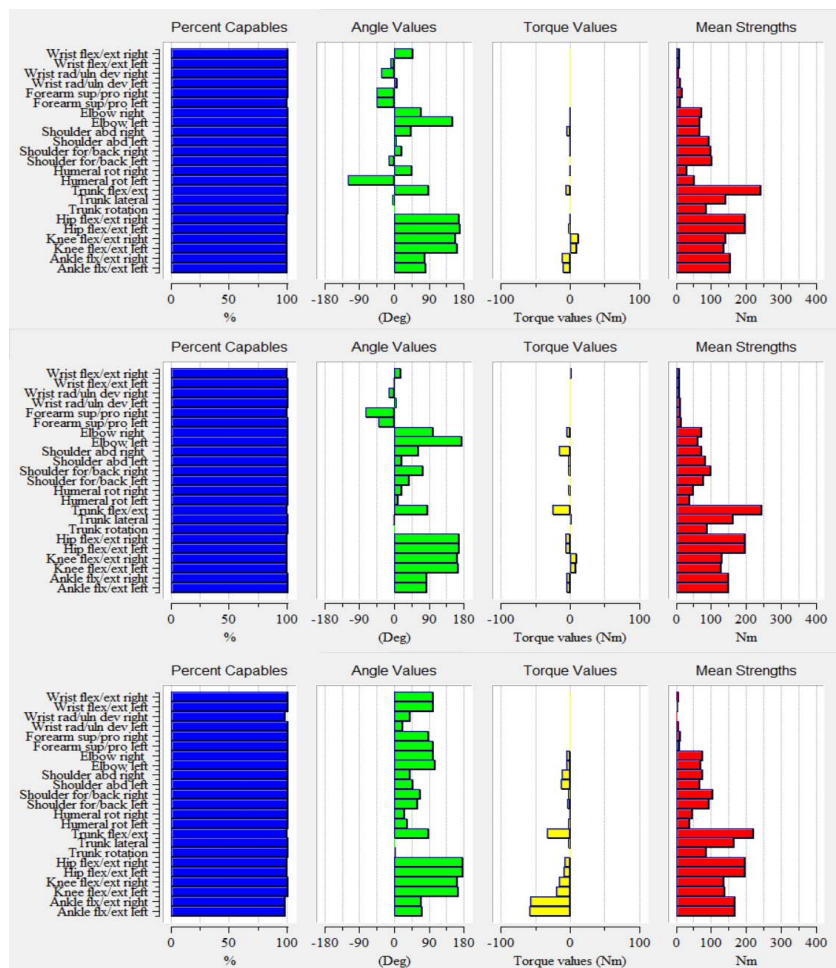


图 13 静态强度预测图表结果二
Fig.13 Static strength prediction chart result II

常范围。表明在这种姿势下身体部位处于较为健康状态。

2) 作业姿势二结果显示:各关节部位均未有受力负荷现象。如图13所示:Angle Values(角度值)均处于正常范围内;Torque Values(转矩值)处于正常范围内;Mean Strengths(平均强度)处于正常范围内。表明在这种姿势下身体部位处于较为健康状态。

3) 作业姿势三结果显示:髋关节、手腕关节、踝关节有轻微受力影响。如图13所示:Angle Values(角度值)处于正常范围内;Torque Values(转矩值)处于正常范围内;Mean Strengths(平均强度)处于正常范围内。表明在这种姿势下身体部位处于较为健康状态。

优化仿真结果结论:优化后的清洗作业车设计方案经过Jack仿真验证,结果表明,车辆优化设计使作业人员的作业负荷、作业易操作性、作业效率得到明显改善。同时改进后的车辆外形尺寸符合GB 1589-2016的要求。

4 结语

本文通过层次分析理论,对清洗作业车设计进行优化。作业人员最佳操作区域距离地面的高度为1 090~1 490 mm,储存空间与风机箱相结合,使用滑轨结构打开储存空间可以有效降低作业人员的作业负荷。由于各方面的限制,本次研究仍存在诸多不足之处,如没有考虑作业人员自身的身体健康状况、气候差异等因素。

参考文献:

- [1] 吴水丕,邱忠本. 环保垃圾清洁人员之肌肉骨骼伤害与人因风险因子评估[J]. Nephron Clinical Practice, 2017, 5(1): 3-87.
WU Shui-pi, IU Ben-zhong, Musculoskeletal Injury and Human Factors Risk Assessment of Environmental Waste Cleaners[J]. Nephron Clinical Practice, 2017, 5(1): 3-87.
- [2] 任再青,张伟. 便捷式飞机液压系统清洗车的设计[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2018, 31(4): 657-660.
REN Zai-qing, ZHANG Wei. Design of Cleaning Vehicle for Aircraft Hydraulic System[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2018, 31(4): 657-660.
- [3] 中国民用航空局. 航空燃油供应系统清洗作业车: MH/T 6122—2020[S]. 北京: 中国民用航空局, 2020.
Civil Aviation Administration of China Cleaning vehicle for aviation fuel supply system: MH/T 6122-2020 [S] Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2020.
- [4] 陈国妃,肖萌,黄良俊. 基于人机工程学的ATM机分析与再设计[J]. 工业设计, 2022(8): 32-34.
CHEN Guo-fei, XIAO Meng, HUANG Liang-jun. Atm Analysis and re-Design Based on Ergonomics[J]. Industrial Design, 2022(8): 32-34.
- [5] 张瑞秋,李泽,李育奇. 肌肉骨骼疾患风险评估方法趋势研究[J]. 包装工程, 2020, 41(14): 49-60.
ZHANG Rui-qiu, LI Ze, LI Yu-qi. Trends of Risk Assessment Methods for Musculoskeletal Diseases[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(14): 49-60.
- [6] ANANDAKUMAR R, BALASUBRAMANIAN K R, SIVAPIRAKASAM S P, et al. Postural Discomfort Analysis of EOT Crane Operators[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 912(6): 062019.
- [7] SHAFTI A, LAZPITA B U, ELHAGE O, et al. Analysis of Comfort and Ergonomics for Clinical Work Environments[C]//2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Orlando, FL, USA. IEEE, 2016: 1894-1897.
- [8] 刘琴,孙林岩,刘军峰. 公交司机肌肉骨骼损伤风险的工效学分析[J]. 工业工程与管理, 2012, 17(2): 118-122.
LIU Qin, SUN Lin-yan, LIU Jun-feng. Human Factor Analysis on the Musculoskeletal Disorders of Bus Drivers[J]. Industrial Engineering and Management, 2012, 17(2): 118-122.
- [9] 刘小霞,王小平,杨延璞,等. 基于人机工程学的消防车器材布局优化设计研究[J]. 图学学报, 2012, 33(5): 109-113.
LIU Xiao-xia, WANG Xiao-ping, YANG Yan-pu, et al. Optimization and Research of Fire Fighting Truck' Layout Design Based on Ergonomics[J]. Journal of Graphics, 2012, 33(5): 109-113.
- [10] 张丽珍,邵祺,杨加庆,等. 基于肌肉骨骼负荷的上肢姿势不舒适度评价方法[J]. 工业工程与管理, 2017, 22(5): 88-93, 101.
ZHANG Li-zhen, SHAO Qi, YANG Jia-qing, et al. Upper Limb Posture Discomfort Assessment Method Based on Musculoskeletal Loads[J]. Industrial Engineering and Management, 2017, 22(5): 88-93, 101.
- [11] 郭红领,张知田,郁润. 基于危险系数的施工工人不安全行为评估[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(11): 873-879.
GUO Hong-ling, ZHANG Zhi-tian, YU Run. Assessing Construction Workers' Unsafe Behavior Using a Danger Coefficient[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2019, 59(11): 873-879.
- [12] 金书香,黄海潮,张秀芬,等. 邮局分拣工肌肉骨骼损伤工效学调查研究[J]. 中国安全科学学报, 1996, 6(4): 16-18, 12.
JIN Shu-xiang, HUANG Hai-chao, ZHANG Xiu-fen, et al. The Ergonomic Investigation of the Sorter's Performance in the Post Office[J]. China Safety Science Journal, 1996, 6(4): 16-18, 12.