

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S1.038

面向驾驶员心理负荷的拖拉机智能操纵台优化设计

郭苇洁^{1,2} 宋正河^{1,2} 杨 晓^{1,2} 李 臻^{1,2} 李文杰^{1,2} 罗振豪^{1,2}
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 集成化智能操纵台为高端农机的核心共性部件,广泛应用于拖拉机、喷雾机、收获机等大型农机装备,作为与驾驶员直接接触的媒介,对驾驶员的身心健康具有直接影响。针对驾驶员田间作业强度大、心理负荷高的问题,按照驾驶员主动健康要求,选择国产典型操纵台,基于感性工学理论,构建心理负荷指标体系,开展拖拉机智能操纵台的静态人机半物理试验,建立心理负荷主成分模型,优化设计面向最低心理负荷的操纵台。首先,构建心理负荷评价体系,基于国产大型拖拉机实机搭建人机半物理试验台,选择实际犁耕工况的驾驶员操控视频,设计试验方案;其次,选择 10 名具有驾驶经验的拖拉机驾驶员进行试验,记录心理负荷各指标数据;再次,根据试验数据进行心理负荷主成分建模,分析操纵台优化前的心理负荷设计缺陷;最后,基于主成分分析结果,面向心理负荷最小化要求,应用人机工程学理论从界面元素分布、元素颜色、元素形状等方面优化操纵台,得到优化后的操纵台并进行试验验证。结果表明,驾驶员的心理负荷主要由疲劳感受因素与疲劳缓解因素叠加而成;优化前操纵台的心理舒适性平均分为 0.403,其中,疲劳感受因素的主要方面为视觉及头颈疲劳(权重为 0.458),疲劳缓解因素的主要方面为作业自我效能感受(权重为 0.578);优化后的操纵台心理舒适性平均分提升为 2.048,能显著缓解心理负荷。本文研究成果可为当前智能拖拉机驾驶舒适性设计提供一定参考依据,助力补齐农机装备主动健康理论短板。

关键词: 智能操纵台; 驾驶员; 心理负荷; 人机半物理试验; 主成分分析; 优化设计

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0340-08

Optimization of Tractor Intelligent Console for Driver’s Psychological Load

GUO Weijie^{1,2} SONG Zhenghe^{1,2} YANG Xiao^{1,2} LI Zhen^{1,2} LI Wenjie^{1,2} LUO Zhenhao^{1,2}
(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Beijing Key Laboratory for Optimal Design of Modern Agricultural Equipment, Beijing 100083, China)

Abstract: The humanized and less humanized operation is still the main working mode of the current mechanized operation. As the core common component of the high-end agricultural machinery, the integrated intelligent console is widely used in tractors, sprayers, harvesters and other large agricultural machinery equipment. As a medium of direct contact with the driver, it has a direct impact on the physical and mental health of the driver. Aiming at the problem of high strength and high psychological load of manual operation, and the requirements of operators’ active health, the domestic typical console was selected. Based on Kansei engineering theory, the psychological load index system was constructed, and the static man-machine semi-physical test of tractor intelligent console was carried out. The principal component model of psychological load was established, and the console based on minimum psychological load was optimized. Firstly, the psychological load evaluation system was constructed, and the man-machine semi-physical test bed was built based on the domestic large tractor. The actual driving video of ploughing condition was selected and the test scheme was designed. Secondly, totally 10 drivers with tractor driving experience were selected to test and record the psychological load index data. Thirdly, the principal component model of psychological load was established according to the experimental data, and the design defects of the psychological load of the console before optimization were analyzed. Finally, based on the results of principal component analysis, in order to minimize the psychological load, the

收稿日期: 2022-06-29 修回日期: 2022-08-16
基金项目: 国家自然科学基金项目(32201671)、中国科协科技智库青年人才计划项目(20220615ZZ07110119)和中国农业大学 2115 人才工程项目
作者简介: 郭苇洁(1999—),女,硕士生,主要从事车辆人机工程学研究,E-mail: guoweijie2406@163.com
通信作者: 杨晓(1989—),男,讲师,博士,主要从事土壤-机器-生态系统绿色高效运行机理研究,E-mail: yangxiao2020@cau.edu.cn

man-machine engineering theory was applied to optimize the console from the aspects of interface element distribution, element color and shape. The optimized console was obtained and then verified by experiments. The results showed that the psychological load of the driver was mainly composed of fatigue perception factors and fatigue mitigation factors. The average psychological comfort score of the console before optimization was 0.403. The main fatigue perception factor was visual and neck fatigue (weight: 0.458), and the main fatigue mitigation factor was job self-efficacy (weight: 0.578). The average score of the optimized console psychological comfort was increased to 2.048, which can significantly alleviate the psychological load. The research results can provide some reference for the design of comfort of intelligent tractors, and it can help to improve the design theories of agricultural machinery equipment active health.

Key words: intelligent console; driver; psychological load; man-machine semi-physical test; principal component analysis; optimization design

0 引言

随着科技的发展,大型拖拉机已逐步实现现代化、智能化,犁耕工况下的无人化技术研究也逐步成熟。但是,有人化和少人化操控依然是当前拖拉机的主流操控模式,因此需要面向驾驶员主动健康要求,开展驾驶室共性部件的人机工程设计。随着大型拖拉机智能化水平的提升,操纵杆件、表盘等传统人机界面已经逐渐被智能集成化的操纵台所代替。而且拖拉机、喷雾机与收获机的操纵台通用性很强,是大型农机装备的核心共性部件。国内长期未着重关注智能操控台的人因设计理论与方法,国外长期封锁智能操控台的产品销售渠道,造成了我国智能操控台技术的短板。因此,为了提升智能机器与驾驶员人因行为的融合程度,降低事故发生率,拖拉机操作台的优化设计将成为提高拖拉机综合性能的重要研究内容。

研究人员在人机界面设计理论^[1-4]、心理负荷理论^[5-7]、心理负荷试验方法^[9-16]和主成分方法应用^[17-20]等方面开展了大量研究,但当前研究的不足主要表现在问卷选项离散化,农机操纵台心理负荷考虑欠缺等方面。本文针对当前驾驶员心理负荷高、驱动成分不明、优化对象不明确、人因试验台和方案不切实际的问题,构建犁耕工况下驾驶员心理负荷指标体系,搭建基于国产大型智能拖拉机操纵台的人机半物理试验台,开展人机交互试验,运用主成分分析法提炼心理负荷驱动因素,进行操纵台优化设计,计算优化前后平均得分,使静态心理负荷满足驾驶员可承受程度,为动态时的舒适性和高效操控提供必要条件。以期为补齐农机装备人因短板提供一定理论依据。

1 心理负荷试验设计

1.1 心理负荷指标体系构建

本文心理负荷试验采用主观评定法获取驾驶员

的感受类信息。通过问卷采集原始数据,获得优化设计的依据。其中,问卷设计主要包括内容及选项设计,而确定问卷内容的前提是构建完整的心理负荷指标体系。

根据认知负荷理论的总负荷分类^[21]及相关研究中心理负荷评估指标的选取^[22-23],主要从静态操纵台界面外在负荷、个体认知负荷、内在特征负荷3个方面,确定了6项心理负荷指标,即6个主题目,分别为:视觉及头颈疲劳,即问询驾驶员的眼头颈负荷程度;手臂疲劳,即问询驾驶员手臂各部位疲劳感受;认知疲劳,即问询驾驶员的辨识及反应状态;心理努力程度,即问询驾驶员的压力感受等;焦虑程度,即问询驾驶员的焦虑程度;作业自我效能感受,即问询驾驶员的主观能动性水平。所有心理负荷指标叠加则产生总心理负荷,如图1所示。

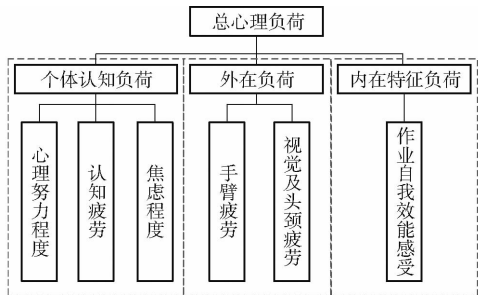


图1 心理负荷指标体系
Fig.1 Psychological load index system

问卷题目围绕操纵台的设计点及能反映心理负荷的各项指标来编制,便于后续获得明确的优化方向。题目内容还参考了NASA-TLX、WP、SWAT等^[24]经典量表的框架模式及表述方法,以简明扼要、直截了当作为表述的标准,来询问驾驶员感受。为提高测量结果的准确性,本问卷设计为多维度式,围绕上述6个主题目设置多个子题目,总计41个题目,使问卷内容覆盖更加全面。

1.2 心理负荷主观测量的线段比例法

目前,国内外心理负荷问卷的测量方式不同,国

内传统心理负荷测量方法为选项型问卷,其具有以下缺点:①数据离散化,不能测得相邻选项之间的驾驶员心理负荷。②离散化数据不能进行更深入的统计理论建模与分析。③通过增加选项密度的方法,依然难以获得相对准确的心里负荷数据。

国外已将选项型问卷改进为线段型问卷,用线段比例代表心理负荷程度,具有以下优点:①通过试验驾驶员标记线段长度的方式,可以间接反映当前心理负荷的承受程度。②通过线段长度比例计算可将心理数据连续化。

因此,本问卷参考国外心理负荷问卷测量方法,在李克特量表传统选项形式上改进,采用一种心理测量线段的打分形式,如图 2 所示,将整个线段作为连续变量,线段上的每一点均可代表一个具体的感受程度,驾驶员以取点的方式填写问卷,以上即为问卷选项形式的设计。

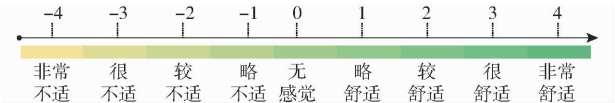


图 2 心理测量线段

Fig. 2 Psychometric line segment

1.3 试验步骤

1.3.1 试验模型制作

试验将一种国内经典操纵台作为研究基础,以心理负荷试验的形式考察其结构设计的优缺点及影响因素等。

操纵台模型主要以产品手册为依据,根据手册中操作台相对驾驶室其他部件和人体相对操纵台的尺寸为依据,再结合生活经验,对操纵台各部分尺寸进行校正。另外,还要制定好操纵台与试验座椅的装配方案,待上述设计完成,采用 Creo 6.0 软件进行操纵台模型的绘制,产品及模型如图 3a 所示。

1.3.2 人机半物理试验台搭建

模型绘制完成后,进行人体坐姿及手臂姿态仿真,模拟驾驶员正常乘坐时的状态,观察到“人”手臂放置自然,角度适宜,可以实际运用。随后则进行操纵台模型加工,制作完成的实物将在真实驾驶室环境中进行模拟操作试验。试验场景如图 3b 所示。

操纵台与拖拉机座椅扶手能够成功、稳定装配,人机半物理试验台搭建完成。

1.3.3 试验流程制定

在试验问卷编制完成及试验模型加工制作完成后,需制定细致的试验流程以保证试验正常、顺利进行,试验流程如图 4 所示。

由于我国拖拉机驾驶员的男女比例一般介于 19:1 至 9:1 之间^[25],考虑拖拉驾驶员地域分散且数



图 3 人机半物理试验台

Fig. 3 Man-machine semi-physical test bench

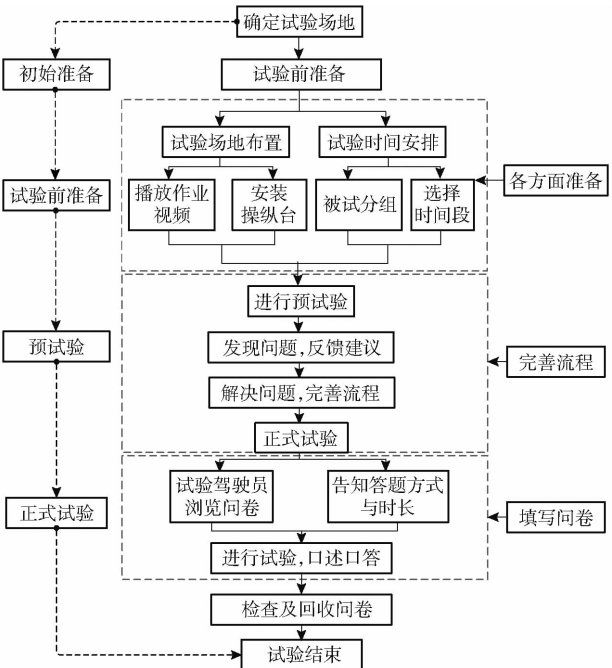


图 4 试验流程图

Fig. 4 Test flow chart

量少,故本试验选择有驾驶经验的 9 位成年男性与 1 位成年女性作为试验驾驶员,在确定驾驶员后提前告知其试验注意事项,包括:禁止饮酒或功能性饮料,保证身体状态良好等。另外,还需将多个驾驶员平均分为 2 组,避开饭前饭后等特殊时段,在 2 d 内的同一时间参加试验。

驾驶室内模拟工作视频选择第一人称视角的犁耕工况作业视频,如图 3c 所示,为试验驾驶员提供实况下作业的操作指导,其中还穿插了农田环境景象,提高试验驾驶员的沉浸感。

1.3.4 试验

随机选择 2 名驾驶员进行预试验,结束后收集信息反馈,以此完善试验方案:在正式试验前,应向驾驶员提前发送操纵台实物产品图像及实际操作视频,要求其完成 5 min 的浏览观看,获取对操纵台基

本功能的认知。

正式试验中主试应做到试验标准化,还应避免“试验者期望效应”^[26],比如对符合预期的答案表示满意情绪等。待驾驶员准备就位,先分发问卷,告知答题方式与时长,再对操纵台功能做简要介绍,进入正式试验阶段,在 10 min 内完成问卷。试验场景如图 3d 所示。

2 试验数据分析

2.1 问卷可靠性检验

本问卷属于感受、态度类量表,要保证问卷有意义,首先进行问卷可靠性检验,可靠性越高的问卷,越不受时间、地点的影响,用其进行检测得到的结果也较为稳定^[27]。对问卷整体及各维度的信度分别进行计算与检验。

首先,开展整体信度检验。信度检验是通过计算量表的 Cronbach's Alpha 系数来检验量表的内部一致性。Cronbach's Alpha 系数为 0.8~0.9、0.7~0.8、0.65~0.7,分别表示量表的内部一致性非常高、较好、可以接受。但是,当信度检验结果小于 0.65,则各题项不一致程度较高,量表或某个维度需要进行题目的修订。根据上述标准,进行信度计算,得问卷的整体信度为 0.883,即问卷的整体信度有效可用。

其次,开展局部信度检验。由删除项后的 Cronbach's Alpha 系数可知,各题项删除项后的 Cronbach's Alpha 系数相较于问卷总系数 0.883 有较小的变化,且绝大多数都小于 0.883,即问卷绝大多数题项都具有重要意义,删除题项不能明显提高问卷信度,故该问卷的题目均可保留。

2.2 描述性分析

正式试验中,驾驶员男女比例为 9:1,分为 2 组,在连续 2 d 的同时段进行试验,最终收集了 10 份试验问卷,问卷回收率为 100%。除可靠性检验,为保证后续分析有效且有意义,还需要对最后一题:“驾驶员对于本次模拟试验的认可程度”的数据进行计算,得出该题的平均得分为 2.24 分,即驾驶员态度在较为认可的程度之上;标准差为 0.368,即各数值较接近平均值,数据较为准确,具有研究及分析价值。

为使所收集的数据显示出清楚的基础信息,方便后续的具体分析,故将数据进行整理和计算,得到优化前操纵台各模块平均得分为 0.403。根据优化前得分可知,最低分项是操纵台形状,最高分项是手柄位置,按键颜色、滚轮、模块辨识度、模块便利程度的得分相近。因为负分有较大的优化空间,所以

优化时需要重点考虑负得分的模块;对于得分较高的设计点,如模块辨识度、按钮位置等,将参考其现有的形式及特点,在此基础上进行设计创新。

2.3 主成分分析

主成分分析可以最大程度保留信息,将繁多的原始指标转换成少量综合指标进行评价^[28]。在本研究中,以心理负荷指标作为研究重点,利用主成分分析简化变量并最大限度地保留原有变量所反映的影响操纵台设计的因素信息^[29]。

2.3.1 主成分计算结果

利用 SPSS 25.0 软件对数据进行主成分分析,得到 KMO 和巴特利特球形检验表,所得数据信息同样对各因素之间的关联程度进行了二次检验。其中:KMO 值为 0.662>0.6,显著性水平 Sig 值为 0.030<0.05,其值均符合主成分分析的适用条件,即本研究适合采用主成分分析法进行进一步地数据处理与分析。

如表 1 所示,通过主成分分析得到特征值、方差贡献率及累积贡献率。主成分 1 和主成分 2 的特征值分别为 3.737 和 1.01,其方差贡献率分别为 62.28% 与 16.83%,累积方差贡献率为 79.11%,故提取出 2 个主成分,即 2 个主成分涵盖了 6 个心理负荷指标 79.11% 以上的信息。6 个指标的特征值还可以用碎石图的形式展示,如图 5a 所示,图形整体呈现先陡后缓的趋势,第 1 条线段最陡,因此第 1 个因子涵盖信息最多^[30],达 62.28%,往后则依次变缓,信息减少。

表 1 特征值、方差贡献率及累积贡献率
Tab.1 Eigenvalue, variance contribution rate and cumulative contribution rate

成分个数	特征值	方差贡献率/%	累积贡献率/%
1	3.74	62.28	62.28
2	1.01	16.83	79.11
3	0.65	10.83	89.94
4	0.31	5.16	95.10
5	0.22	3.60	98.70
6	0.08	1.30	100

2.3.2 心理负荷特征因子分析

主成分分析载荷如图 5b 所示,特征向量矩阵如表 2 所示,反映了各指标在每个主成分上的载荷。由图 5 和表 2 可知,第 1 主成分涵盖信息最多,且视觉及头颈疲劳(X_1)、认知疲劳(X_3)、焦虑程度(X_4)、心理努力程度(X_5)在第 1 主成分上有较高载荷,即第 1 主成分基本反映了上述指标信息,代表了综合疲劳感受因素;而手臂疲劳(X_2)、作业自我效能感受(X_6)在第 2 主成分上有较高的载荷,即第 2

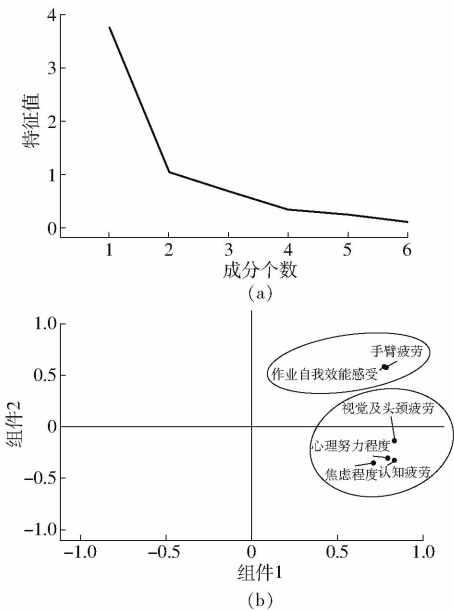


图5 主成分分析结果

Fig.5 Results of principal component analysis

表2 特征向量矩阵

Tab.2 Feature vector matrix

心理负荷因素	主成分 1	主成分 2
视觉及头颈疲劳 X_1	0.833	-0.141
手臂疲劳 X_2	0.785	0.569
认知疲劳 X_3	0.714	-0.356
焦虑程度 X_4	0.832	-0.334
心理努力程度 X_5	0.794	-0.306
作业自我效能感受 X_6	0.771	0.578

主成分基本反映了上述指标信息,代表了疲劳缓解因素。

在得出第 1、第 2 主成分所包含的指标信息基础上,先设主成分 1 的函数为 Y_1 ,主成分 2 的函数为 Y_2 ,根据表 2 中的主成分载荷系数,以及特征值、方差贡献率及累积贡献率表中第 1 及第 2 主成分的特征值进行计算,列出表达式

$$Y_1 = 0.458X_1 + 0.407X_2 + 0.370X_3 + 0.431X_4 + 0.411X_5 + 0.399X_6 \quad (1)$$

$$Y_2 = -0.141X_1 + 0.569X_2 - 0.356X_3 - 0.334X_4 - 0.306X_5 + 0.578X_6 \quad (2)$$

式(1)体现了试验驾驶员所产生的生理疲劳和心理负荷存在耦合的关系,且其生理指标中的视觉及头颈疲劳的系数更大,为 0.458,即需降低 Y_1 综合疲劳感受因素,主要对视觉及头颈疲劳这项生理指标所包含的设计点进行优化改造;同理,式(2)中的作业自我效能感受 X_6 系数明显较大,为 0.578,即需降低 Y_2 疲劳缓解因素,主要对作业自我效能感受所包含的设计点进行优化改造。上述内容为后续方案的制定提供了切入点。

3 操纵台心理负荷人因工程学分析

根据描述性分析及主成分分析的结果,综合驾驶员的评价与反馈信息,基于人因工程理论进行心理学分析,明确操纵台感性工学设计水平,逐一进行分析优化,以确定优化方案的具体内容。

3.1 视觉及头颈疲劳心理负荷分析

试验操纵台的显示器尺寸得分为 -0.101,即显示器尺寸不符合驾驶员需求,增加了视觉及头颈疲劳。另外,在试验中,80%的试验驾驶员自发地表示显示屏尺寸过小,影响了操纵体验。故在优化设计中,在保证整体结构协调的前提下,扩大显示器尺寸,以降低信息辨识类负荷,缓解视觉疲劳。

头颈疲劳主要与显示器的高度及角度有关。显示器高度项得分为 0.417,而显示器高度与显示器的倾斜角度存在重要的关联,因此也要对显示器的倾斜角进行优化。

根据人机工程学知识,显示器的顶部与眼睛的距离应比显示器的底部稍远,且根据国际标准化组织(ISO 1998)的建议,显示器视觉显示的最佳位置应低于水平视线 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$,如图 6a 所示。另外,根据显示器倾斜角合理范围的相关研究^[31],显示器与视线持平时,在垂直面内转动 20° 为佳,如图 6b 所示,但考虑操纵台显示屏的位置低于视线,故增大此角度以扩大驾驶员的视角范围,将原显示器与垂直面近乎平行的设计改为在垂直面内偏转约 25° 。

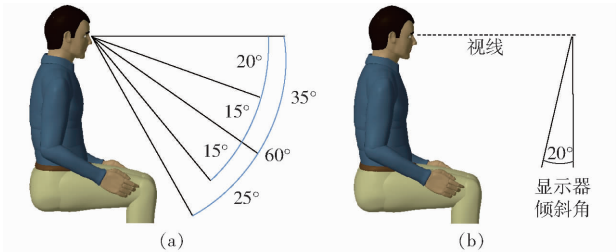


图6 显示器视角最佳范围图

Fig.6 Best range of display view

3.2 手臂疲劳心理负荷分析

结合试验驾驶员的信息反馈可知,试验操纵台末端凹陷平台设计使驾驶员放置手臂时产生额外的负荷,因此,优化时将其设计为平台。平台尺寸依据 GB 10000—88《中国成年人人体尺寸》和 GB/T 13547—92《工作空间人体尺寸》,查得 95% 的 18 ~ 60 岁成年男性的小臂小于等于 258 mm,据此设计操纵台总长度为 260 mm,并对整体的布局及外观进行美化。

操纵台手柄认知疲劳部分得分相对较高,尤其是手柄位置及手柄形状模块,故优化设计在这两部分基础上进行。试验中,对于少数手掌较大的男性

驾驶员,手柄高度略显不足,且抓握空间不充裕,即心理舒适空间不足,因此适当加长手柄并扩大操作空间,以提高驾驶员的操作体验;另外,参考驾驶员的信息反馈:左侧斜置手柄集成装置相较于右侧柱形手柄不利于快速操作,故将左侧手柄改良优化为易抓握的柱形。

3.3 信息高效接收区域心理负荷分析

试验操纵台的模块分布范围一项得分为负,而模块的分布范围影响着手臂放置与操作控制两方面,属于重点待优化内容。

根据人机界面区域划分原则,如图 7a 所示。A 区为一般区域,不宜布置精度高的操作装置;B 为视觉和手操作的最佳区域;C 为辅助区域;D 为最大区域。在优化中应根据上述原则,将按键操作模块设置在操纵台的 B 区,又考虑人眼对于水平方向的界面辨识速度及精度更高,故将按键盘整体外形设计成横向长方形。

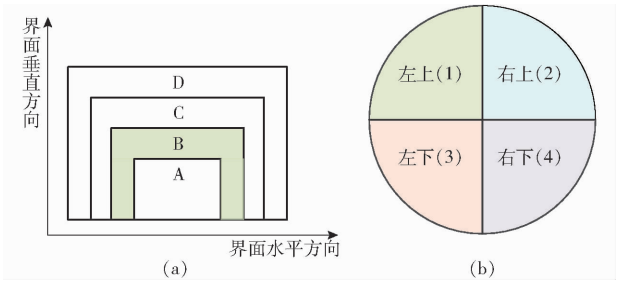


图 7 信息接收区域划分

Fig. 7 Division of information receiving areas

由视觉规律的相关研究可知,当眼睛偏离视中心时,在偏离距离相等的情况下,人眼对左上限的观察最优,即为“最佳视域”,后依次为右上限、左下限、右下限,如图 7b 所示。操纵台显示屏的界面则参考该原则划分。

3.4 操纵台色彩心理负荷分析

考虑手柄颜色得分为 -0.450,按键颜色得分 0.763,两项指标均存在优化的空间。结合色彩学知识以及驾驶员信息反馈可知,手柄与试验台主体的色彩一致,缺乏区分度。故在优化设计中,应使手柄色彩更加鲜明,与主体成对比色,使操作者能快速辨识及定位,如图 8d 所示。

按键颜色的设计可参考操纵台的整体配色,运用高对比色,进行适应性及美观性的调整。

3.5 按键细节心理负荷分析

优化前操纵台按键位置得分为 2.104,表明其位置较为合理,符合驾驶员操作习惯,后续优化将考虑在其原有位置基础上参考驾驶员的部分信息反馈进行优化修正,比如:将偏左的按钮盘位置向中部调整,如图 8c 所示,以及将左手柄功能按钮向右手柄

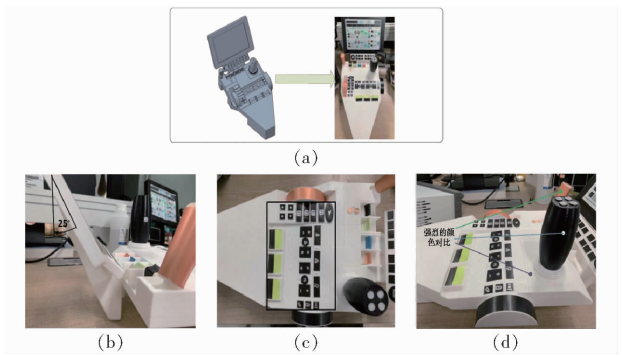


图 8 优化后操纵台细节图

Fig. 8 Detail diagram of optimized console

转移并置于顶部,形成顶部平面按钮盘,便于驾驶员进行同步操作。

另外,按键的分布区域已经划定,但各按键间也应符合格式塔心理学原则^[32],符合驾驶员的认知习惯,注重连续性、一致性等原则。另外,根据驾驶员在试验中的信息反馈可知,试验台的按键尺寸较小且过于密集,不利于手指的精准操作,故将上述两项进行优化。考虑相较于曲线轮廓,人眼对直线轮廓更易于接受,故将按键的形状主要设计为矩形,少量过渡按键设计为椭圆形,以做区分。同时,降低关键按键间的密度,以提高操纵响应水平。

3.6 模块心理负荷分析

以模块辨识度为例,其优化前得分较好,为 0.773,设计优化时保留原有模块间配色、图形元素搭配等主要特征,在模块排列、功能区分及整体协调度方面进行创新,比如:各按钮表面增加了高对比色功能图标以增加区分度,提高辨识度,如图 8 所示。此外,模块间整齐排列增加了元素协调度,加深驾驶员对各模块的方位记忆,提高辨识速度。

模块便利化程度得分为 0.844,其得分与上述各项存在重要的联系,因此,为避免与上述项产生优化干扰,只作为综合水平的参考,不做具体的优化处理。

4 操纵台优化后试验验证

根据上述方案优化后的模型利用 3D 打印等技术进行等比例加工制作,如图 8a 所示。制作完成的实物模型将用于后续的试验验证。

试验验证的流程应去除图 4 中的预试验部分,其他过程保持一致。此外,优化后操纵台心理负荷试验还需要保证与优化前操纵台的试验场景及条件一致,如:试验场景布置、试验时间、驾驶员分组、问卷内容等,以防干扰因素对操纵台优化效果产生影响。

4.1 操纵台优化后优点

(1)如图 8b 所示,优化后模型的屏幕倾角为

25°,使得驾驶员更容易以俯视角度观察屏幕上的信息,减缓头颈及视觉的疲劳。

(2)如图 8c 所示,操纵台不宜精密操作的 A 区域作为手臂放置区,根据人体尺寸计算确定总长度约为 260 mm。按键盘置于操纵台的重点视操区域,呈横向长方形,便于驾驶员视觉注意及反应操作;操纵台按键的尺寸进行了扩大,形状以矩形为主,椭圆为辅,且关键按键区密度降低,以提高操纵响应水平。

(3)如图 8d 所示,优化后的手柄、按键与操纵台主体之间存在着强烈的色彩对比,避免大脑产生额外的辨识负荷,显著提高了驾驶员的辨识速度与操作精度。另外,手柄的操作空间也进行了扩大,保证了适宜的心理空间。

综上,优化方案基于人机工程学知识对各个分模块进行了缺陷改善,提高了优化后操纵台的各项性能。

4.2 试验验证

将优化后的操纵台作为试验主体,再次进行心理负荷试验,将获得的验证性数据进行整理与计算,见表 3,优化后平均得分为 2.048。

对比优化前试验数据可知,优化后模型各模块的平均得分均有一定程度的提高。优化后的操纵台各方面舒适性均实现了显著提升。

5 结论

(1)线段法主观测量问卷比选项法问卷更适于

表 3 操纵台优化前后平均得分

Tab.3 Average score of console before and after optimization

优化对象	优化前得分	优化后得分
显示器尺寸	-0.101	1.852
显示器高度	0.417	2.362
模块分布范围	-0.235	1.895
操纵台形状	-0.936	2.259
抓握空间	0.173	1.789
按键位置	2.104	2.650
按键形状	0.384	2.153
按键颜色	0.763	1.456
整体布局与美观	0.687	2.651
手柄位置	1.130	2.135
手柄形状	1.110	1.894
手柄高度	0.269	1.992
滚轮	0.635	1.845
模块辨识度	0.773	1.565
模块便利程度	0.844	2.442
按键间密度	-0.711	2.352
手柄颜色	-0.450	1.546

心理负荷测量,为后续统计建模提供量化数据。

(2)驾驶员的心理负荷主要由疲劳感受因素与疲劳缓解因素叠加而成,疲劳感受因素的主要方面为视觉及头颈疲劳(权重为 0.458),疲劳缓解因素的主要方面为作业自我效能感受(权重为 0.578)。

(3)优化前、后操纵台静态心理负荷的得分分别为 0.403 和 2.048,经过人机优化后,能显著降低驾驶员的心理负荷,为真实场景下作业时驾驶员心理舒适性和高效操控提供必要条件。

参 考 文 献

[1] 鹿峰. 基于认知理论的人机界面标准化设计原则[J]. 大众标准化,2021(22):74-76.
LU Feng. Design principles of human-machine interface standardization based on cognitive theory[J]. Popular Standardization, 2021(22): 74-76. (in Chinese)

[2] 袁树植,高虹霓,王崴,等. 基于感性工学的人机界面多意象评价[J]. 工程设计学报,2017,24(5):523-529.
YUAN Shuzhi, GAO Hongni, WANG Wei, et al. Multi-image evaluation for human-machine interface based on Kansei engineering[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2017,24(5): 523-529. (in Chinese)

[3] ZHOU A. Cybernetics and human-computer interaction:case studies of modern interface design[C]//2014 IEEE Conference on Norbert Wiener in the 21st Century: Driving Technologys Future: Boston, 2014:1-6.

[4] SUNDAR S, BELLUR S, OH J, et al. Theoretical importance of contingency in human-computer interaction: effects of message interactivity on user engagement[J]. Communication Research,2016,43(5):595-625.

[5] 冯源,李彦蕾,李一凡,等. 基于注意力机制的多分支 LSTM 心理负荷评估模型[J]. 计算机应用研究,2021,38(11):3371-3375.
FENG Yuan, LI Yanlei, LI Yifan, et al. Novel multiclass classification framework with multi-branch LSTM and attention mechanism for mental workload evaluation[J]. Application Research of Computers, 2021,38(11): 3371-3375. (in Chinese)

[6] 陈翰林. 认知负荷在界面设计中的应用研究进展、热点与趋势[J]. 设计,2022,35(1):44-47.
CHEN Hanlin. Research progress, hot spot and trend of cognitive load application in interface design[J]. Design, 2022, 35(1): 44-47. (in Chinese)

[7] CHEN J, XUE L, RONG J, et al. Real-time evaluation method of flight mission load based on sensitivity analysis of physiological factors[J]. Chinese Journal of Aeronautics and Astronautics,2022,35(3):450-463.

[8] NORBERT F, THEA R, THORSTEN M. Model-based development of a mental workload-sensitivity index for subject clustering [J]. Theoretical Issues in Ergonomics Science,2020,21(6):684-708.

[9] 杨迪,徐进,吕能超,等. 山地城市立交出入口驾驶员心理负荷研究[J]. 中国科技论文,2022,17(2):195-202.
YANG Di, XU Jin, LÜ Nengchao, et al. Mental workload of drivers at interchanges in mountain cities [J]. China Sciencepaper, 2022,17(2): 195-202. (in Chinese)

- [10] 蒋建军,席钉姿,杨丹,等. 数字化核电厂界面管理任务对操纵员心理负荷及注意力影响研究[J]. 南华大学学报(社会科学版),2021,22(3):1-9.
JIANG Jianjun, XI Ruzi, YANG Dan, et al. Effect study of digital nuclear power plant interface management task on operators' mental workload and attention[J]. Journal of University of South China (Social Science Edition), 2021,22(3): 1-9. (in Chinese)
- [11] 周海蛟. 铁路机车司机的心理负荷问题研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
ZHOU Haijiao. Research on the psychological load of railway locomotive drivers[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [12] 周宏. 高速铁路司机心理负荷及其对工作绩效影响研究[D]. 北京:北京交通大学,2017.
ZHOU Hong. Psychological load of high-speed railway drivers and its impact on job performance[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [13] ELIO R, MARCO P, MARCO F, et al. The use of pressure mapping to assess the comfort of agricultural machinery seats[J]. International Journal of Industrial Ergonomics,2020,77:1-8.
- [14] YARD T, PATTERSON P. The impact of navigation system display size and environmental illumination on young driver mental workload[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour,2020,74:330-344.
- [15] GRASSMANN M, VLEMINCX E, VON LEUPOLDT A, et al. The role of respiratory measures to assess mental load in pilot selection[J]. Ergonomics: The Official Publication of the Ergonomics Research Society,2016,59(6):745-753.
- [16] ARVIDSSON H, LARSSON G, LARSOLLE A. Easily applicable methods for measuring the mental load on tractor operators [J]. Journal of Agricultural Safety and Health,2020,26(1):5-14.
- [17] 郝小倩,李洪,王瑞军,等. 基于主成分分析法的玉米品种的抗病性评价[J]. 湖北农业科学,2022,61(4):78-80,84.
XI Xiaoqian, LI Hong, WANG Ruijun, et al. Evaluation of disease resistance of maize varieties based on principal component analysis[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022,61(4): 78-80,84. (in Chinese)
- [18] 蔡云芳,季凯帆,向永源. 基于主成分分析的太阳光谱信息提取[J]. 光谱学与光谱分析,2018,38(9):2847-2852.
CAI Yunfang, JI Kaifan, XIANG Yongyuan. Extraction of solar spectral information based on principal component analysis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018,38(9): 2847-2852. (in Chinese)
- [19] LI Yuan, YANG Dongsheng. Local component based principal component analysis model for multimode process monitoring [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering,2021,34(6):116-124.
- [20] YANG Xuebin, HE Ruru, WANG Ji, et al. Effect of two kinds of similarity factors on principal component analysis fault detection in air conditioning systems[J]. Journal of Donghua University,2021,38(3):245-251.
- [21] 龙玲. 认知负荷理论综述[J]. 新智慧,2018(6):47-48.
LONG Ling. Overview of cognitive load theory[J]. New Wisdom, 2018(6): 47-48. (in Chinese)
- [22] 李金波,许百华,田学红. 人机交互中认知负荷变化预测模型的构建[J]. 心理学报,2010,42(5):559-568.
LI Jinbo, XU Baihua, TIAN Xuehong. Construction of prediction models of cognitive load in human-machine interaction process[J]. Acta Psychologica Sinica, 2010,42(5): 559-568. (in Chinese)
- [23] 孙崇勇. 认知负荷的测量及其在多媒体学习中的应用[J]. 高等教育研究,2015,36(12):86.
SUN Chongyong. Measurement of cognitive load and its application in multimedia learning[J]. Journal of Higher Education, 2015,36(12): 86. (in Chinese)
- [24] 袁义凡. 近十年认知负荷在界面设计中的应用研究综述[J]. 设计,2020,33(17):116-118.
YUAN Yifan. Review on the application of cognitive load in interface design in recent ten years[J]. Design,2020,33(17): 116-118. (in Chinese)
- [25] 钟文杰,徐红梅,徐奥. 基于 CATIA 的拖拉机驾驶室人机系统舒适性分析与评价[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017,38(1):47-51.
ZHONG Wenjie, XU Hongmei, XU Ao. Comfort analysis and evaluation of man-machine system in tractor cab based on CATIA [J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2017,38(1): 47-51. (in Chinese)
- [26] 路婧一,张野,张珊珊. 心理实验法述评[J]. 科教文汇(下旬刊),2017(1):150-151.
LU Jingyi, ZHANG Ye, ZHANG Shanshan. A review of psychological experiment method [J]. Science and Education Literature (Late Issue), 2017(1): 150-151. (in Chinese)
- [27] 胡典顺,朱展霖. 基于 SPSS 与 AMOS 的问卷信度效度检验——以数学焦虑、数学态度和数学效能的关系研究为例 [J]. 教育测量与评价,2020(11):3-7,28.
HU Dianshun, ZHU Zhanlin. The reliability and validity test of the questionnaire based on SPSS and AMOS—a case study on the relationship among mathematical anxiety, mathematical attitude and mathematical self-efficiency [J]. Educational Measurement and Evaluation, 2020(11): 3-7,28. (in Chinese)
- [28] PRABHUNE S S, SATHC S R. Reconstruction of acomplete dataset from an incomplete dataset by PCA (principal component analysis) technique: some results[J]. International Journal of Computer Science and Network Security: IJCSNS,2010, 10(12):195-199.
- [29] 陈泽榕. 主成分分析法评价汕头境内主饮用水源地水质[J]. 广西水利水电,2021(2):38-41.
CHEN Zerong. Water quality evaluation for main drinking water sources in Shantou City by principal component analysis method[J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2021(2): 38-41. (in Chinese)
- [30] 姜兰芳,李晓丽,曹勇,等. 基于主成分分析的面筋聚集仪预测小麦品质[J]. 食品科学,2022,43(14):85-92.
JIANG Lanfang, LI Xiaoli, CAO Yong, et al. Prediction of wheat quality by gluten aggregator based on principal component analysis[J]. Food Science,2022,43(14):85-92. (in Chinese)
- [31] 姬丽静,王延琦,万红,等. 合理范围内显示器倾斜角度对头部舒适度的影响[J]. 现代制造工程,2016(8):67-70.
JI Lijing, WANG Yanqi, WAN Hong, et al. The display tilt angle effect on head comfort in reasonable range[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2016(8): 67-70. (in Chinese)
- [32] JOHAN W, JACOB F, SERGEI G, et al. Acentury of gestalt psychology in visual perception: II. Conceptual and theoretical foundations[J]. Psychological Bulletin,2012,138(6):1218-1252.