doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.042

棚电式智能拖拉机远程操控界面注意力响应特性与优化设计

张 诚[1] 胡楚文[1] 罗振豪[1] 宋正河[1] 王英锋[2] 宋来辉[2] 杨 晓[1]
(1. 中国农业大学工学院，北京 100083；2. 中科滕森(山东)智能装备有限公司，潍坊 262100)

摘要：目前远程人机交互终端主要通过视频图像和数值图标进行堆叠式展示，但缺乏人因设计导致监控者在应对故障时信息难以理解、心理负荷高，影响应急响应的可读性和准确性。本研究针对棚电式无人驾驶电动拖拉机远程终端堆叠式界面信息获取人因设计不足的问题，开发界面注意力采集系统，基于反应时间与识图准确率等注意力工效指标，开展对堆叠式界面无故障、突发单/两/三因素故障时的注意力工效试验，探析注意力工效对堆叠式应急界面的响应规律，分析界面人因注意力分布场演变规律；开展人因工程学界面布局优化设计，对优化后的分布式界面与集中式界面进行试验验证，并综合评价界面注意力易读性与准确性的提升效果。研究结果表明，堆叠式界面、分布式界面、聚集式界面的单因素故障平均反应时间分别为1 096、1 294、1 097 ms，两因素故障平均反应间分别为1 123、1 142、1 293 ms，三因素故障最快发现预警反应时间分别为820、1 108、749 ms；注意力分布场分别呈现趋大模块性、趋高对比度性和趋中心性的分布规律，并分别呈向变化点、向显著点的演变规律；界面优化方案最终选取聚集式界面，其应急响应的平均反应时间较堆叠式界面降低3.4%、2 s内准确率平均提升11.66%、4 s内准确率平均提升34.94%、监控者心理负荷降低11.99%。

关键词：远程监控界面；注意力应急响应差异性；注意力应急响应分布场；界面应急响应模式；智能拖拉机
中图分类号：S232.7；TB472 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-1298(2024)S1-0292-13

Efficiency Response Characteristics and Optimization Design of Remote Control Interface for Shed Electric Intelligent Tractor

ZHANG Cheng[1] HU Chuwen[1] LUO Zhenhao[1] SONG Zhenghe[1] WANG Yingfeng[2]
SONG Laihui[2] YANG Xiao[1]
(1. *College of Engineering, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*
2. *Tesun (Shandong) Intelligent Equipment Co.,Ltd.,Weifang* 262100, *China*)

Abstract: At present, remote human-computer interaction terminals are mainly displayed in a stacked manner through video images and numerical icons. However, the lack of human factors design makes it difficult for monitors to understand information and has a high psychological load when dealing with faults, which affects the readability and accuracy of emergency response. Aiming to address the problem of insufficient human factors design in the remote terminal stacking interface information acquisition of unmanned electric tractors in facility greenhouses, an interface attention collection system was developed, and based on attention efficiency indicators such as reaction time and image recognition accuracy, attention efficiency experiments were conducted on the stacking interface when there were no faults and sudden single/two/three factor faults. The response law of attention efficiency to the stacking emergency interface was explored, and the evolution law of the distribution field of human factors attention on the interface was analyzed. Human factors engineering interface layout optimization design was carried out, the optimized distributed interface and centralized interface were verified through experiments, and the improvement effect of interface attention readability and accuracy was comprehensively evaluated. The research results showed that the average response time for single factor faults in stacked interfaces, distributed interfaces, and clustered interfaces were 1 096 ms, 1 294 ms and 1 097 ms, respectively. The average response time

收稿日期：2024-07-28 修回日期：2024-08-26
基金项目：山东省重点研发计划项目(2023CXGC010715)
作者简介：张诚(2001—)，男，硕士生，主要从事车辆人机工程学研究，E-mail：S20233071507@cau.edu.cn
通信作者：杨晓(1989—)，男，副教授、博士，主要从事车辆人机工程学研究，E-mail：yangxiao2020@cau.edu.cn

for two factor faults was 1 123 ms, 1 142 ms and 1 293 ms, respectively. The fastest detection and warning response times for three factor faults were 820 ms, 1 108 ms and 749 ms, respectively. The attention distribution fields exhibited distribution patterns of increasing modularity, increasing contrast, and centering, evolving towards change points and significant points, respectively. The interface optimization plan ultimately selected a clustered interface, which decreased the average response time of emergency response by 3.4% compared with that of a stacked interface, increased the average accuracy rate by 11.66% within 2 seconds and 34.94% within 4 seconds, and reduced the psychological load on the monitor by 11.99%.

Key words: remote monitoring interface; differences in attention and emergency response; attention emergency response distribution field; interface emergency response; smart tractor

0　引言

随着数智化技术的进步，拖拉机人机关系演变过程如下：①驾驶员 1.0时期，以纯人工驾驶拖拉机为代表，驾驶员通过操控拖拉机操纵面板的机械式拉杆驾驶作业，此时数智化程度为零，表现为人机配合模式。②驾驶员 2.0时期，以人工辅助驾驶智能拖拉机为代表，此时智能拖拉机具有一定数智化程度，驾驶员在驾驶室内操控多功能集成手柄进行作业，拖拉机机组通过安装的各种传感器与控制系统进行自动化作业，驾驶员进行辅助性操控或监控工作，表现为人机协同模式。③驾驶员 3.0时期，此时以新能源无人拖拉机人机分离为代表，驾驶员在远程进行监督工作，在应急时人工远程接管无人拖拉机进行作业，此时驾驶员向监控员演变，表现为人机融合模式。

棚电式无人驾驶电动拖拉机是支撑设施农业高质量发展的重要装备，缓解了棚内人工作业温度高、湿度大、尾气浓的问题，但自动驾驶系统的环境感知与运动决策子系统存在传感器鲁棒性低、算法动态自调整能力弱的技术瓶颈，导致无人拖拉机发生电机失稳、作业装置失灵、整机失控时，需人工进行远程干预，因此无人驾驶电动拖拉机远程终端监控界面应急响应技术是无人化种植关键技术之一。并且，远程监控界面人机交互的高工效设计是监控终端的关键技术，决定了人工干预时能否在第一时间发现整机故障点并采取有效干预措施。

人工驾驶拖拉机转变为自动驾驶作业拖拉机后，人机交互方式产生了人机分离的性质变化，需对无人驾驶拖拉机人机交互模式重新定义。首先，人机角色产生了质的变化，远程操控终端使得传统人工驾驶由机械性的操控转变为高脑力负荷的监控。其次，人工驾驶能较为实时地处理电动拖拉机隐形故障与调整作业质量，做到了防微杜渐；而无人驾驶系统往往积累了隐形故障，由于系统本身鲁棒性差和积分算子较多的原因，导致故障积累到一定程度后突然爆发，造成拖拉机远程停车，严重影响了设施农业效益，因此需要监控者实时观察农艺落实情况；与此同时，电动拖拉机本体的多电机、多线路、多系统的温度、电流、传输和动力学参数等机械参数也需要监控者同步进行观测并在头脑中进行作业工况分析，消耗了大量的脑力劳动，若遇到电动拖拉机突发情况，监控者很难进行有效决策与人工干预。因此，无人驾驶电动拖拉机远程监控终端人机交互界面设计需要结合界面人因注意力特征进行深度优化，以满足监控者注意力分布人因习惯，减缓其脑力疲劳，提高处理突发情况的能力。

国内外学者经过多年实践发现人机协作过程是人工驾驶向无人驾驶过渡的必然阶段，需要研究其演变规律。在设施农业装备方面，赵博等[1]以联合收获机为例，阐述了农业装备信息化管理技术的未来发展方向，并建议提升故障诊断精度与泛化能力，并对界面进行人因认知特性工艺优化；在果园装备作业方面，窦汉杰等[2]针对果园生产管理智能装备控制需求，提出应基于果园环境，利用尖端技术提升果园智能化装备远程人机交互质量。目前无人农机远程监控界面的设计特点为：①图形显示界面参数众多，监控者所需观测的机器参数被淹没。②图形显示界面区分度不足，监控者所需观测的机器参数没有用颜色或特征图标所区分。③图形显示界面参数布局杂糅，不同种类的农机作业参数没有按界面空间进行模块化分类。

在无人农机远程监控终端产品方面，温生芳[3]基于智能感知技术建立了适用于山旱地农机作业数据的实时监控界面；黄修炼等[4]基于 Winform 软件开发技术搭建了具有数据传输、数据分析和历史轨迹显示的监管界面；李继领[5]基于地理信息系统等信息技术，研发了面向服务体系结构的智能农机监管平台；KOUSAR 等[6]利用模糊逻辑结合物联网技术，开发了水培精准农业的监控系统；HAMZA 等[7]基于射频通信采集温室数据，开发温室大棚远程监控人机界面；LUO 等[8]研制了保护性耕作田间作业质量参数监测显示终端。

在界面人因认知规律方面，刘涛[9]基于操作人员在田间监控作业过程中的视觉注意机制，围绕显示界面对农机监控显示界面进行设计与优化；陈驰航[10]将人机界面复杂度分为界面显示复杂度以及界面控制复杂度，探究了人机界面复杂度对人因失误产生的影响；季煜恒等[11]通过寻优获取人机界面的最优布局并进行虚拟仿

真评价，获取了满足人因工程学准则最优布局；谢凝等[12]对影响人机界面可靠性的性能塑造因子进行了分类；DONGBIN等[13]针对无人机操作界面提出了利用虚拟/增强现实和触觉技术的类人操作界面；CHEN等[14]将显著性、努力程度、期望和价值框架与量化界面的要素变异成本相结合制定了操作界面。

在人因认知特性场分析方面，刚春明[15]结合个体视觉认知特征归纳出3种典型网课界面注意力布局；牛佳然[16]基于认知特性与界面信息架构布局，提出了复杂显控作战界面信息分配方式；侯钰婷等[17]利用认知负荷理论对交互界面构成元素进行了拆解，为认知次任务的交互界面提供有益的设计参考；JIN等[18]评估了不同条件下车辆语音交互界面对驾驶人注意力和短时记忆的影响，探究了驾驶人在认知任务中表现出的认知效率规律；LIU等[19]基于熵-FTA-德尔菲的人类可靠性评估，增强了人体工学交互设计可靠性；LIM等[20]提出了有人驾驶和无人驾驶飞机的航空电子人因工程学交互界面的改进方案。

本研究针对设施大棚无人电动拖拉机远程监控堆叠式界面信息淹没、图标设计区分度不足、界面布局杂糅，导致监控者脑力负荷大、应急响应不及时、界面触控定位不精准的问题，设计堆叠式界面参数图标与布局方式，从单/两/三因素告警界面的人因注意力分布特性试验入手，分析注意力静态分布特征，从人因应急响应的准确率和反应时间角度，探究注意力动态分布对界面应急故障告警的响应规律，明晰单/两/三因素预警界面的注意力分布差异程度，探寻注意力分布场对远程监控终端告警的演变规律，开展基于人因工程学的分布式和聚集式界面布局优化设计并试验验证，以期为无人电动拖拉机在应急响应状况下的高工效远程监控界面设计方法研究提供参考。

1 堆叠式远程监控界面应急响应人因注意力特性试验方案

1.1 人机交互远程界面初步设计

通过对国内外无人拖拉机远程监控界面的调查研究(图1)，设计了堆叠式监控界面(图2)。监控界面左上方为大棚内部作业实时图像显示，左下方为无人电动拖拉机在大棚片区作业的实时位置显示，界面右侧为信息传输系统、无人拖拉机机器本体和农艺作业质量监测显示。

通过对经典故障和事故的案例分析，为工况软件的预警数据库添加最常发生的故障类型及其监控参数。设定的初始值来自数据库中的故障记录、事故报告以及行业标准文献。软件界面设计遵循用户的操作习惯，确保界面直观、易用。界面包括实时作业监控、故障警报和部分操作参数等功能模块。确保被试者可以通过界面快速发现农机运行参数并进行调整，并且软件能够实时监控关键参数，并在参数超出预设范围时发出警报。



图1 无人农机远程监控界面参考方案

Fig. 1 Design diagram of existing remote monitoring interface

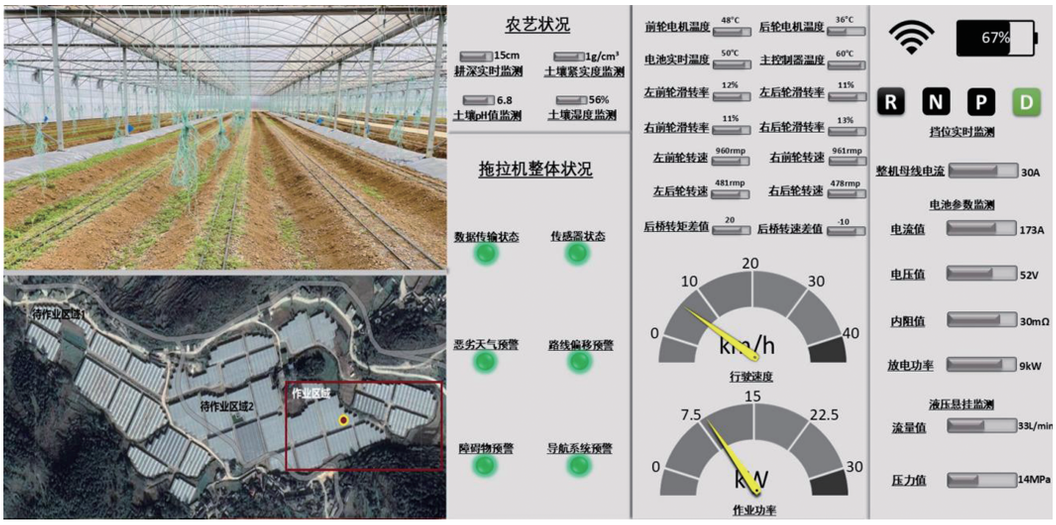


图 2　堆叠式监控界面(无预警情况)

Fig. 2　Stacked monitoring interface (no warning situation)

1.2　远程终端告警因素

如表1~3所示,通过对本设施无人电动拖拉机预警界面调查研究,发现大多数拖拉机采用农艺参数、作业环境和拖拉机本体参数进行监管,因此根据国内外监管界面方案设计了24种(含单因素预警19种、双因素预警3种、三因素预警1种和无预警1种)预警情况。为模拟现实中电动拖拉机真实作业的预警界面场景,试验设计了多个预警情况同时发生的警告界面,在设计多因素预警同时发生状况时考虑了预警之间的逻辑关系并进行了优化。

1.3　注意力响应指标

注意力工效指标体系包括:反应时间、在2 s内初次发现预警的准确率和是否在4 s内发现所有预警的准确率,其中反应时间是被试者在接收到预警信息后做出反应的时间,单位为ms,在试验软件中通过记录被试者鼠标划动到预警信息位置的时间戳得到反应时间;注意集中位置通过记录被试者在接收到多个预警信息时的注意力轨迹顺序,以判断被试者对不同信息的优先级和处理顺序,试验软件中通过记录的时间戳来分析用户的点按先后顺序,截取每个时间戳对应的瞬时鼠标坐标作为被试者的注意力位置;通过统计被试者对预警信息的准确点击位置和正确位置的比例来得到准确率,试验软件以理想状态下正确注意范围的±100区间作为判断标准,随后输出所有预警情况下的平均准确率。上述指标细则如表4所示。

1.4　理论方法

采用团队自主研发的无人农机装备高工效远程监控干预界面试验系统[21],此系统利用试验结果建立数据集,收集人机界面试验中参与者的眼睛注视点坐标,随后利用注视点的高斯核计算生成显著性图。由于现实情况下远程干预界面显示信息需要手动点击界面报警按钮才能有效地干预。因此在获取试验数据时,使用鼠标在警告界面上滑动的轨迹作为采样数据以达到相同效果。随后对试验中收集的数据(鼠标坐标和时间戳)进行预处理。

理论方法步骤为:①汇总来自同一图像的所有参与者的试验数据。②对处理的数据进行DBSCAN(基于密度的噪声应用空间聚类)聚类方法来生成固定图,DBSCAN能够通过样本点的密集区域辨别出中心点、边界点和噪声点,中心点是其附近邻域内点数大于或等于设定的最少点数目的点,其余点位被视作边界点和噪声点,理论方法中的点位对应本试验中根据时间戳捕捉的鼠标坐标,DBSCAN处理前的点位图如图3a所示,处理后的点位图如图3b所示。在数据预处理的后续阶段对注视点进行高斯模糊处理,生成注意力场热力图(图3c)。

试验中人眼可观测区域需进行模糊化处理,人眼对感兴趣区域的分辨率是最高的,其余区域会随着视网膜的注意角度而下降,因此监控者在关注界面时并不是将注意力平均分布在远程监控界面上,而是根据感兴趣区域形成了注意力的变化,感兴趣区域以外的区域都会被动减少注意力分配,因此需要对所测试界面进行模糊化处理,以尽量消除外界注意力干扰,使得测试时注意力水平均处于相同起点。如图4所示,本试验首先生成依靠人眼分辨率生成的模糊图来模拟周边视觉的注意力下降,定义$F(\theta)$为人眼感兴趣区域和界面中心的偏移函数,则分辨率映射公式为

$$F(x,y)=\frac{\Omega}{\Omega+\theta(x,y)} \tag{1}$$

其中

$$\theta(x,y)=\frac{1}{p\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}} \tag{2}$$

式中　(x,y)——界面中心坐标

Ω——人在正常状态下视网膜观测角度

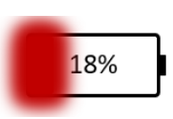
θ——人眼感兴趣区域和界面中心偏移角度

(x_1,y_1)——试者的注意中心(即鼠标坐标)

p——适合人眼观看的固定像素数

表1 单因素预警情况

Tab. 1 Single-factor warning situation

序号	预警图标	预警名称	故障详细描述	故障检测方法
1		恶劣天气预警	拖拉机作业天气环境恶劣	根据联网的气象局发布的预警进行实时监测，在农田附近安装气象监测设备，如风速仪和雨量计等实时监测气象数据
2		路线偏移预警	拖拉机作业路线偏移	使用摄像头或传感器对拖拉机周围的环境进行实时监测，检测是否偏离预定的路线
3		障碍物预警	拖拉机遇障碍物无法继续作业	使用安装在拖拉机前部和侧部的距离传感器，通过监测拖拉机与周围障碍物的距离来预警。当距离传感器检测到障碍物靠近时，会发出警报信号
4		导航系统预警	拖拉机导航系统故障无法继续作业	监测GPS信号的质量和稳定性，如果信号突然中断或出现异常，则为导航系统故障
5		数据传输状态异常预警	拖拉机作业数据传输故障	监测数据传输速率是否正常，如果传输速率突然降低或中断，则为数据传输异常
6		传感器状态预警	拖拉机传感器故障	监测部分传感器输出的数值是否在正常范围内，如果出现异常数值可能出现了传感器故障
7~10		拖拉机前/后轮/电池/芯片温度预警	拖拉机前轮/后轮/电池/芯片温度过高/低	通过传感器检验相关部分温度是否出现异常
11~14		电池异常预警	拖拉机电池电流值/电压值/内阻值/放电功率过高/低	通过传感器检验电池部分相关值是否出现异常
15		整机电流预警	拖拉机整机电流过高	通过传感器检验整机电流处电流值是否出现异常
16~17		液压悬挂异常预警	拖拉机液压悬挂系统流量值/压力值过高/低	通过传感器检验液压悬挂处流量值和液压值是否出现异常
18		电量不足预警	拖拉机电量不足	监测电池剩余电量值
19		网络断开预警	拖拉机失去网络连接	监测拖拉机信号是否正常传输

当$\theta(x,y)$与Ω相同时，图像的分辨率将为注意位置(x,y)的1/2，试验中没有被被试者观测的位置将以此种形式展现。

试验中图像应用了6层高斯金字塔式的快速近似[22]以达到实时处理模糊位置，如图4所示。

本次试验开发的软件在处理速度和用户友好性方面也展现了明显的优势。通过优化算法和简化操作流程，用户能够快速上手，无需专业背景便可生成注意力热力图。若软件的注意力仿真结果不符合要求，则不需再进行实车试验，直接重新设计界面；若注意力仿真结果符合要求，则再进行实车试验，因此这种设计极大降低试验验证成本。本研究开发的试验软件与真实拖拉

机界面样式相同，并且在数据采集、处理和分析方面均表现出了显著的优越性，确保了在实际应用中的高效性和可靠性。

表 2　两因素预警情况

Tab. 2　Two-factor warning situation

序号	预警图标	故障详细描述
1		拖拉机导航系统故障，无法继续作业；拖拉机作业路线偏移
2		拖拉机液压悬挂系统流量过低；拖拉机传感器故障，无法继续作业
3		拖拉机整机电流过高；拖拉机前轮电机温度过高

表 3　三因素预警情况

Tab. 3　Three-factor warning situation

序号	预警图标	故障详细描述
1		拖拉机后轮电机温度过高；拖拉机作业天气环境恶劣；拖拉机电量不足

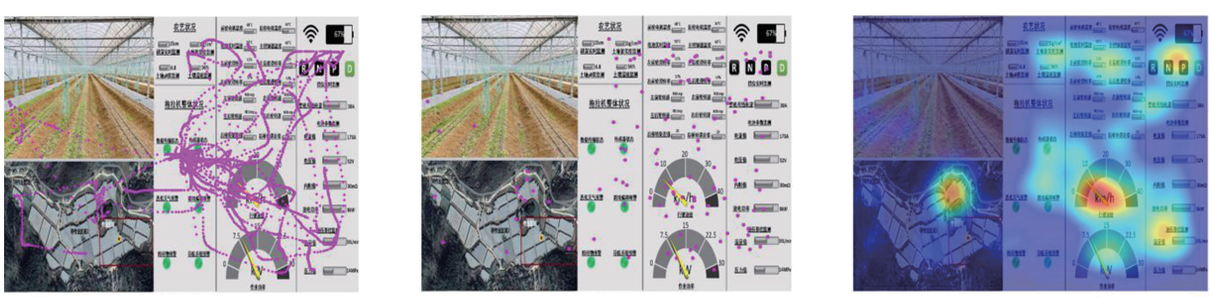
表 4　注意力采集指标

Tab. 4　Collection indicators of attention

名称	测试方法
反应时间	通过注意力测试软件采集
注意集中位置	通过采集注意力坐标生成对应热力图
准确率	对比采集注意力坐标与正确坐标(±100)
位置时间序列	通过采集注意力坐标对应时间可得

1.5　试验台布置

在无人电动拖拉机模拟远程监控室内，开展预警界面对被试者注意力和反应时间测试试验。试验台整体布置如图 5 所示：选用 24 英寸显示屏作为模拟监管显示屏，另用注意力采集设备记录被试者反应时间。



(a) 试验统计注视点　(b) 滤波后注视点　(c) 注意力场热力图

图 3　试验部分图像处理结果

Fig. 3　Processing results of test part

1.6　试验流程

基于研究团队自研 30 kW 无人电动拖拉机提供远程作业监控界面，试验场景选取某设施大棚，单向犁耕作业，速度不高于 10 km/h 的作业场景录像。三预警情况界面如图 6 所示，故障图像采取随机播放(试验中每类警告仅出现一次)，每类警告界面停留 4 s，每隔 15 ms 采集被测者操纵鼠标在界面中的坐标。

试验流程如下图 7 所示，试验流程如下：

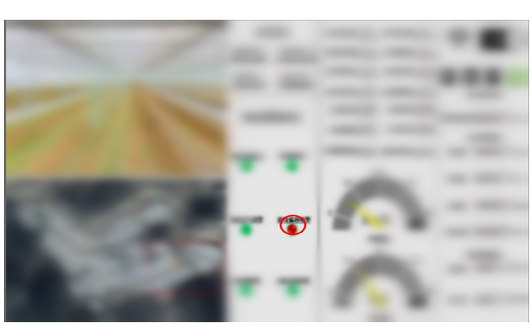


图 4　实时模糊化处理

Fig. 4　Real time fuzzification processing

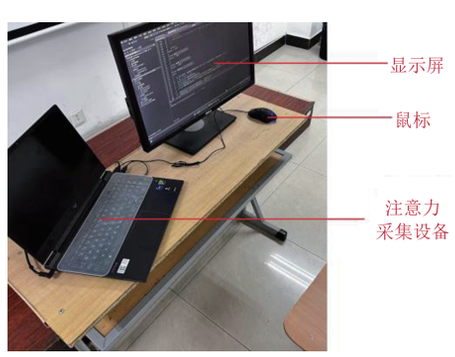


图 5　试验台整体布置

Fig. 5　Overall layout of test bench

(1)被试者于显示屏前位置坐好，试验人员向被试者介绍试验内容及要求，被试者签订知情同意书并进行信息统计。

(2)被试者根据个人舒适度调整与显示屏的距离，在试验前观察电动拖拉机正常情况下的作业视频，每人 8~10 min。在观看过程中初步了解每个预警模块名称及功能。

(3)试验人员更换准备好的监控界面,其中包括单因素预警场景19个、两因素预警3个、三因素预警1个以及无预警界面1个,预警界面发出警报,警报形式为相对应模块变红并发光,每个预警界面持续4 s,被试者应按照自身注意预警的顺序将鼠标划动至警报处,每位被试者需要循环执行上述任务24次。

(4)试验结束后,被试者需按照自身对预警界面的感觉填写对预警界面的问卷评价。

(5)试验过程中出现异常情况需及时记录,并重新进行当次试验。

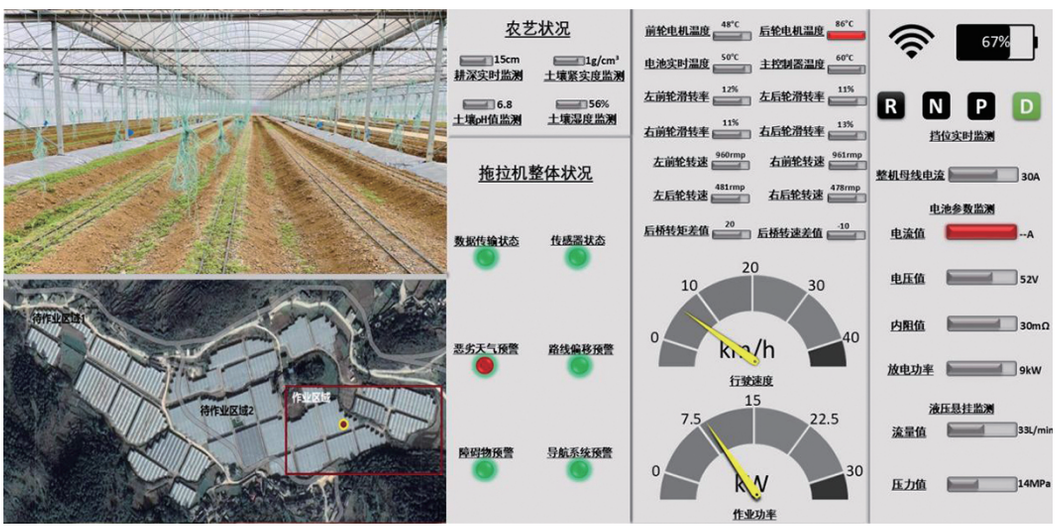


图6 堆叠式界面(三因素预警情况)

Fig. 6 Stacked interface (three factors early warning situation)

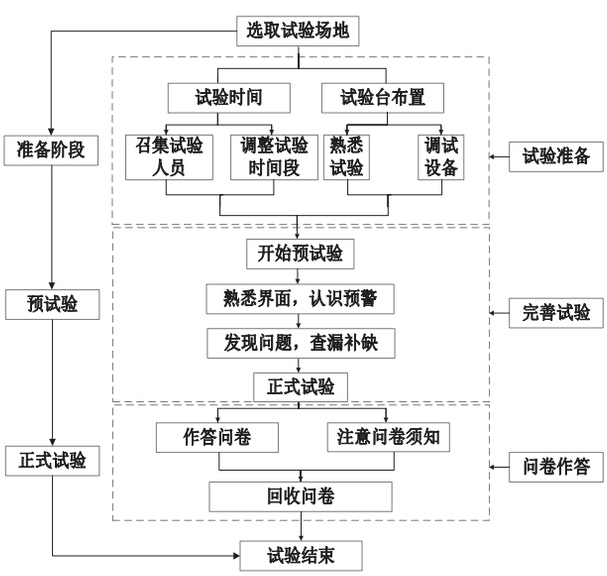


图7 试验流程图

Fig. 7 Experimental flowchart

2 应急响应认知特性分析

2.1 认知特性描述性分析

试验招募被试者28名,其中男性26人,女性2人,所有试验人员身体状况健康,无视、听觉障碍。所有被试人员均具备一定的拖拉机驾驶经验,试验前每位被试人员均需熟悉作业场景,具体为观看8~10 min的拖拉机作业视频。被试者年龄范围在19~24岁之间(平均20.86岁,标准差为1.05岁)。最终回收28人次共672份界面注意力测试结果以及25份有效问卷。

本次试验注意力特性主要以被试者鼠标轨迹是否移动到预警位置为判据。由于试验中出现了在规定反应时间内被试者未找到预警位置的情况,因此去除反应时间的无效数据,剩余有效数据共计441份。其中分别对单因素预警和多因素预警分开分析,因为对多因素预警会有一组反应时间数据,对多因素预警的分析以是否在2 s内初次发现预警和是否在4 s内发现所有预警作为准确率的依据。

经SPSS 26.0进行数据分析(表5),得到设计的单因素预警试验界面在2 s内准确率平均值为60.21%,标准差为0.221 90%;4 s内准确率平均值为65.11%,标准差为0.199 40%;平均反应时间为1 096 ms,标准差为18 ms。设计的多因素预警试验界面在2 s内可被被试者发现预警的准确率平均值为79.50%,标准差为0.133 79%;在4 s内发现所有预警的准确率平均值为25%,标准差为0.078 74%;平均反应时间(多因素预警选取最快发现预警的一组数据)为104 7 ms,标准差为20 ms。

2.2 不同尺度注意力反应时间与准确率差异性

通过不同预警个数的主体间效应多元方差分析,发现故障数量对准确率和反应时间均有显著影响,其中单因素预警界面4 s内准确率为65.11%,两因素预警界面4 s内发现全部预警准确率为26.33%,三因素预警界面4 s内发现全部预警准确率为21%;单因素预警界面平均反应时间为1 096 ms,两因素预警界面平均反应时间为1 123 ms,三因素预警界面反应时为820 ms。不同预警个数的界面在准确率和反应时间的方差分析上均有显

著性影响，其原因是人脑处理信息的认知结构在面对大量信息时受到认知关注程度、认知负担程度和认知反应程度的影响，因此多因素预警情况会导致注意力分散、信息处理效率下降的现象，从而影响准确率和反应时间。三因素预警界面反应时间较短的原因是试验数据选择了首次发现预警的反应时间，这点从其能否发现全部预警的准确率极低可以发现。

表 5　准确率与反应时间描述性分析

Tab. 5　Descriptive analysis of accuracy and reaction time

预警类型	2 s内准确率/%	4 s内准确率/%	反应时间/ms
传感器异常预警	96	96	573.41
导航系统预警	93	36	637.25
电池参数预警(电流)	71	71	888.30
电池参数预警(电压)	75	85	1 141.96
电池参数预警(放电功率)	79	82	1 252.00
电池参数预警(内阻)	46	56	1 274.50
电池实时温度预警	57	67	1 232.63
电量不足预警	46	46	898.50
恶劣天气预警	79	85	1 104.83
后轮电机温度预警	64	64	504.89
路线偏移预警	89	21	819.52
前轮电机温度预警	39	43	1 191.42
数据传输预警	21	32	1 562.78
网络断开预警	68	25	1 523.83
液压监测预警(流量)	68	71	817.85
液压监测预警(压力)	68	18	1 207.27
障碍物预警	93	93	545.38
整机电流预警	89	92	1 067.85
主控制器温度预警	32	39	1 397.45
传感器异常预警+液压监测预警	93	36	637.25
前轮电机温度预警+整机电流预警	68	18	1 207.27
路线偏移预警+导航系统预警	68	25	1 523.83
恶劣天气预警+后轮电机温度预警+整机电流预警	89	21	819.52

2.2.1　界面分区布局易读性差异

设计的堆叠式界面特点主要是中右侧聚集预警情况显示，左侧聚集作业情况显示，从表6可以看出不同故障数量对反应时间有影响，主要是由于在瞬态的反应情况下难以将注意力依次分配在多个预警情况上，因此不同预警个数情况导致的认知方式不同。

人眼对界面预警变化感知有差异性，预警个数的不同主要影响了人眼转移注意力的时间效率，从而使得界面易读性变差。根据GJB-2873-97《军事装备和设施的人机工程设计准则》及安全人机工程准则，眼睛沿着水平方向运动快于垂直方向的运动且不易疲劳，眼睛先看到水平方向的物体，后看到垂直方向的物体[23-24]。当眼睛偏离视中心时，在偏离距离相同的情况下，人眼对左上限的观察最优，其次是右上限，而左下限和右下限最差。在视线突然转移的过程中，约有3%的视觉能看清目标，其余97%的视觉都是不真实的，所以在进行视觉相关工作时，不应该有大范围突然转移视觉的显示变换，当显示变换距离大于整体界面的40%时会降低视觉的准确性。因此在多个预警出现时被试者的注意力需要范围转移，造成了准确率降低且反应时间增加。

表 6　认知特性方差分析

Tab. 6　Analysis of variance of cognitive characteristics

认知特征量	F	p
2 s内准确率	1.934	0.007
4 s内准确率	30.287	<0.001
反应时间	6.160	<0.001

2.2.2　界面色彩模态区分准确性差异

国内外学者研究发现，颜色对工作效率有影响，环境颜色可显著影响任务表现和效率，人眼对橙色、白色和红色的反应时间较短[25-26]，而红色是人认知内联系到警报的潜意识颜色，因此界面中的警报色彩是较为适应人色彩模态认知的，但由于不同预警的预警框面积不同，因此会造成准确性的不同。

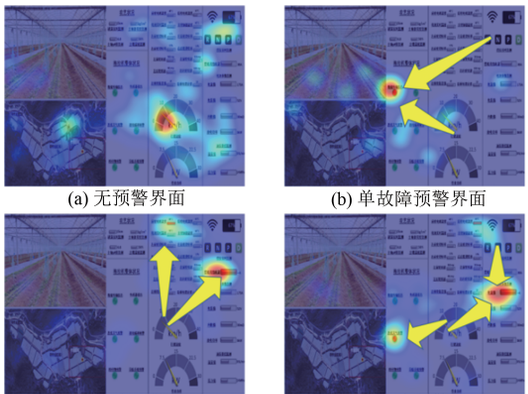
界面色彩设计显著影响了监控者对界面的注意力支配和辨别界面状态的准确性，若界面和图标的颜色对比度不高，极易造成人的认知分配不及时等问题。界面色彩设计不仅要单纯考虑对比度和显著性设计，也要考虑监控者的潜意识经验，例如黑色较白色在人的意识内更“重”，因此依靠色彩可以创造出界面的层次感。堆叠式界面由于底色为灰色，与预警的红色图标对比度不足导致了被试者发现预警的准确性极低，尤其是在多预警发生时难以在有限的反应时间内应对。

2.3　注意力分布场稳定性

注意力场分析以人对界面的注意力聚焦分布为基础，通过对现有界面的认知特性场分析以得到所有被试者的认知共性，进而提供界面优化依据。通过认知特性场分析可以直观地了解被试者的认知分配结构和认知总体量。

如图3c所示，为提取瞬态注意力特性，筛选试验所得的2 s鼠标内轨迹点，得到注意力场热力图。可以看出被试者的认知聚集处多为认知特性场内的显著位置，预警部位的红色区别于正常情况下的绿色，这表明预警位置被分配了更多的认知注意力。但面对多个预警状况时，被试者难以在4 s预警时间内注意到全部预警，这体现在热力图中部分预警位置颜色较浅。

在初始界面中被试者大都观测仪表板和电量等关键数据(图8a)，在界面认知场上体现为较深的颜色，当预警出现时，被试者的认知注意力明显发生位置变换，注意力显著地被支配到预警发生的位置，在单个预警时注意力仍有余量，这体现在分散的注意力热力图上(图8b)，而多个预警情况下注意力明显集中在预警位置且无多余注意力分散的情况(图8c)。

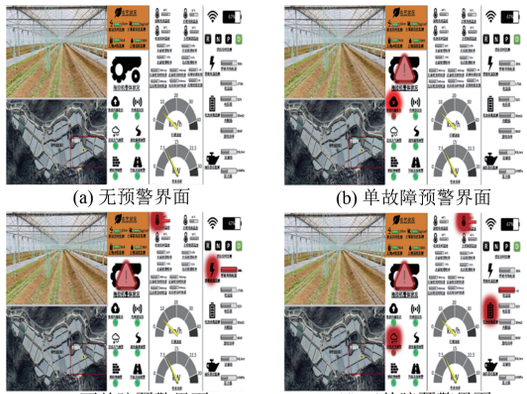


(a) 无预警界面 (b) 单故障预警界面

(c) 两故障预警界面 (d) 三故障预警界面

图 8 堆叠式界面认知场分析

Fig. 8 Cognitive field analyses of stacked interface



(a) 无预警界面 (b) 单故障预警界面

(c) 两故障预警界面 (d) 三故障预警界面

图 9 聚集式界面

Fig. 9 Aggregated interfaces

3 无人电动拖拉机远程监控界面优化设计

3.1 整体优化方案

国内外无人农机远程监控界面设计通常将作业过程置于界面的中央位置，监控界面的功能部分置于两侧和底部，这种设计的优点是可以减少人的认知分配压力，空间设计较为分散的界面往往会带给人较少的认知负荷，但同时增加了当多个预警发生时的注意力支配难度，并且由于界面大小的限制会导致人难以注意到界面的边缘位置。

面向远程人机交互界面的易读性、准确性和稳定性，对无人电动拖拉机远程监控界面整体优化方案主要是保持作业画面一致，将原本的预警功能模块调整至作业画面的两侧及下部。

3.2 局部优化方案

以局部优化为基础设计出区别于堆叠式的聚集式无人电动拖拉机远程监控界面，如图9所示。局部优化设计在预警情况上添加了图标和发光警示，更容易辨别；在界面背景处修改了颜色，增加了对比度；在布局方面提供了分布式布局和聚集式布局两种方式，更能探究出人的认知特性分布。具体解决问题及优化方案如下：

(1)解决设计信息淹没

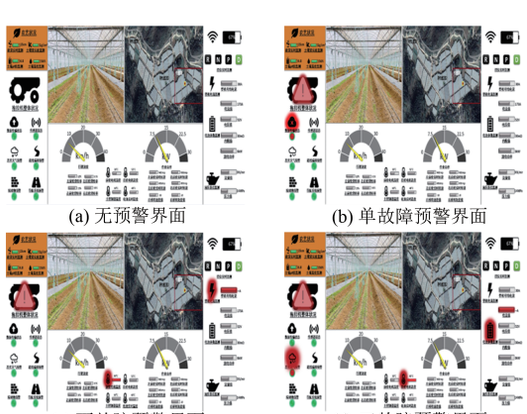
设计信息多且难以分辨的问题会影响监控者在预警发生时全局搜索的认知分配能力，从而导致界面认知分配结果不合理进而降低预警界面效能，当监控者接收大量界面信息时，对最重要的信息进行着重化处理可以显著提高认知效率。经过对初始监控界面的认知特性场分析可以发现被试者的认知多集中在颜色变化的位置并非文字提示部分，如变红的警告灯。因此局部优化方案旨在加强对被试者认知分配规律的应用，在每个文字提示上方增添与预警相关联的图标可以使被试者的注意力迅速集中并减少被试者在全局搜索预警位置的认知负荷。

(2)解决图标设计区分度不足

图标设计区分度不足会显著影响监控者自主寻找关注参数时的难度，缺乏经验的监控者需一一比对不同标志再进行认知处理，这样的过程会大幅降低界面功效。预警图标运用应符合人的认知的抽象图像表达含义，例如车辆电量不足、燃油不足和未系安全带等警告，运用恰当的图标可以大大提高监控者认知能力。因此在图标方面的局部优化方案为在色彩上增添了红色发光元素以模拟人对红色代表警告的天然认知；在界面背景上采用白色配置加大与黑色图标的对比度，如图9所示。

(3)解决界面布局杂糅

界面布局对远程监控界面的影响源于界面不同位置的认知辨识度，人对界面重要位置认知在日常生活中被不断影响，由此可以形成具有普适性的界面功能分配设计方案，例如手机界面普遍将重要的电量及联网显示放置于右上角，因此右上角慢慢变化为认知注意频率较高的位置。针对无人电动拖拉机远程监控界面的界面布局，新设计的界面布局将作业和位置监控画面置于中央位置，预警情况及参数检测区平均分配至界面两侧，界面下方则放置拖拉机行驶参数，设计界面如图10所示。



(a) 无预警界面 (b) 单故障预警界面

(c) 两故障预警界面 (d) 三故障预警界面

图 10 分布式界面

Fig. 10 Distributed interfaces

4　无人电动拖拉机远程监控优化界面试验验证

4.1　验证方案

优化后的试验界面仍由相同的被试者进行与堆叠式无人电动拖拉机远程监控界面试验过程相同的试验，被试者先进行分布式无人电动拖拉机远程监控界面试验，间隔20 min后再进行聚集式无人电动拖拉机远程监控界面试验，以避免短时间内接触多种界面导致的认知复负荷加剧的情况。

通过对3种不同界面的相同试验能够收集到有对比性的数据。这些数据为后续验证优化提供了坚实的基础，使得改进方案不仅依赖于主观判断，而是基于实际表现的分析和比较，从而提高了试验方案的科学性。

4.2　验证结果

界面试验数据统计如表7所示。

表 7　界面试验数据统计

Tab. 7　Interface test data statistics

因素	统计值	界面类型	故障类型	平均值	标准偏差
单因素预警	2 s内准确率/%	分布式界面	综合	69.75	10.479
		聚集式界面	综合	78.84	6.058
		堆叠式界面	综合	60.21	22.190
	4 s内准确率/%	分布式界面	综合	81.37	8.989
		聚集式界面	综合	85.26	6.846
		堆叠式界面	综合	65.11	1.994
	反应时间/ms	分布式界面	综合	1 294.415 3	177.4396 4
		聚集式界面	综合	1 096.889 5	202.3703 1
		堆叠式界面	综合	1 095.607 4	347.1066 9
两因素预警	2 s内准确率/%	分布式界面	综合	66.67	24.007
		聚集式界面	综合	85.67	10.504
		堆叠式界面	综合	76.33	14.434
	4 s内准确率/%	分布式界面	综合	59.33	10.693
		聚集式界面	综合	75.00	9.644
		堆叠式界面	综合	26.33	9.074
	反应时间/ms	分布式界面	综合	1 292.553 3	426.902 39
		聚集式界面	综合	1 141.783 3	75.689 23
		堆叠式界面	综合	1 122.783 3	449.287 79
三因素预警	2 s内准确率/%	分布式界面	综合	79.00	
		聚集式界面	综合	86.00	
		堆叠式界面	综合	89.00	
	4 s内准确率/%	分布式界面	综合	64.00	
		聚集式界面	综合	57.00	
		堆叠式界面	综合	21.00	
	反应时间/ms	分布式界面	综合	1 107.630 0	
		聚集式界面	综合	749.380 0	
		堆叠式界面	综合	819.520 0	

分析2 s内准确率与反应时间，以反映3类界面瞬态注意力工效，3类界面预警情况结果平均值箱图如图11所示。由图11可知，分布式界面和聚集式界面相比于堆叠式界面都有提升，其中聚集式界面在试验中表现最好，聚集式界面2 s内准确率最高，这主要是因为聚集式界面相对于分布式界面将认知结构拆分得过于松散不同，聚集式界面省去了被试者自左至右或自上而下的搜寻预警时间且减少了被试者视线转移的幅度，利用了预警时醒目的色彩使被试者短时间内的认知支配达到较高的水平。

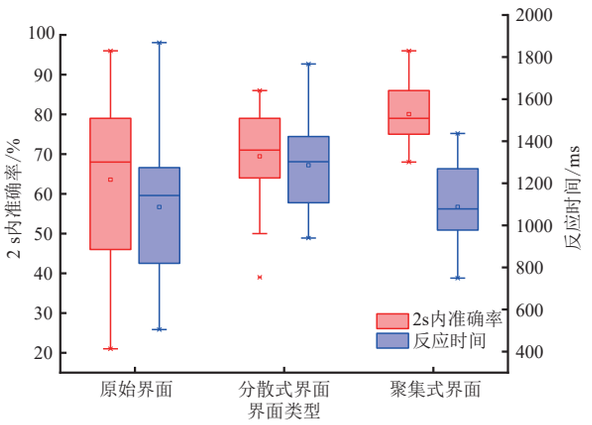


图 11　3种界面2 s内准确率与反应时间箱图

Fig. 11　Three types of interface accuracy and reaction time box diagrams within 2 s

通过结合3种界面估算边际平均值（图12）和表7，可以发现聚集式界面在3种界面内效果最好，聚集式界面在面对不同因素数预警情况时的准确率及反应时间的标准差最小，这表明聚集式界面具有良好的稳定性和易读性且对人的认知分配效果也最好。其次是分布式界面，分布式界面整体效果强于堆叠式界面，但由于过于分散的界面会让被试者的认知负荷加剧，因此分布式界面稳定性较低，且过高的认知负荷也造成了反应时间较高。最后是堆叠式界面，由于堆叠式界面在预警时对比度低、无特殊预警图标调配被试者认知，因此其3项数据表现最为分散。

聚集式界面准确率最高且反应时间最快，准确性和易读性最强。因为聚集式界面和分布式界面都进行了图标的优化，增加了抽象图标的预警范围显示，以此改变被试者的认知分配，被试者优先将注意力转移到预警的图标位置，优化后更合理的图标分配也显著减少了被试者的认知负荷，被试者可以更迅速更容易地寻找到预警位置。而聚集式界面优于分散式界面的原因主要是在同样图标造成的注意力分配下，聚集式界面通过更适合被试者的眼球转动角度进行设计，达到了在被试者注意力最佳转移范围内的优化设计，因此不用过多的转移视线和注意力，在反应时间上体现为时间减少。聚集式界面设计能够减少被试者的认知负荷，被试者无需记忆和跳转多因素图标理解预警类型，可以更流畅地完成任务，因此聚集式界面更优于分散式界面。

通过多元方差分析的多变量检验可以发现，界面类型、预警类型和二者共同作用对2 s内准确率、4 s内准确

率和反应时间p值均小于0.001(表8),因此固定变量对被测参数有极强显著性。发现3种界面的认知特性方差显著性概率小于5%,说明界面的不同布局方式对认知绩效(准确率、反应时间)产生了显著影响。

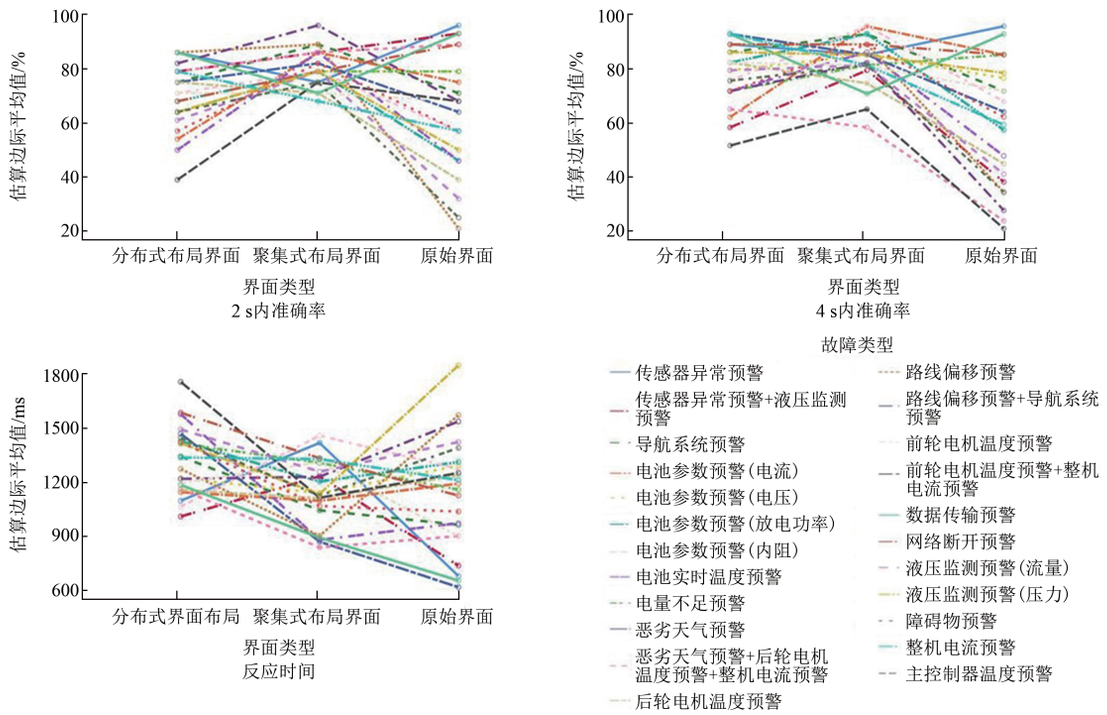


图 12 估算边际平均值

Fig. 12 Estimatation marginal means

表 8 界面类型与预警类型显著性

Tab. 8 Significance of interface type and warning type

效应		F	p
截距	比莱轨迹	28 836.071	<0.001
	威尔克 Lambda	28 836.071	<0.001
	霍特林轨迹	28 836.071	<0.001
	罗伊最大根	28 836.071	<0.001
界面类型	比莱轨迹	16.071	<0.001
	威尔克 Lambda	16.087	<0.001
	霍特林轨迹	16.103	<0.001
	罗伊最大根	21.313	<0.001
预警类型	比莱轨迹	12.987	<0.001
	威尔克 Lambda	15.010	<0.001
	霍特林轨迹	17.301	<0.001
	罗伊最大根	46.318	<0.001
界面类型×预警类型	比莱轨迹	3.141	<0.001
	威尔克Lambda	3.192	<0.001
	霍特林轨迹	3.243	<0.001
	罗伊最大根	5.702	<0.001

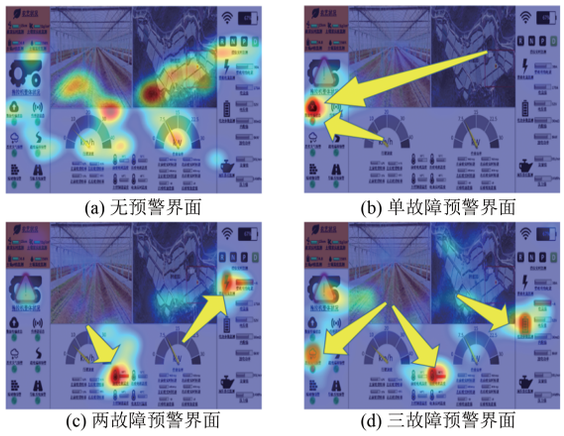
4.3 场分析验证

通过对分布式界面(图13)和聚集式界面的场分析(图14)可以看出,两种界面的被试者注意力分配都集中在色彩配置和图形优化后的预警标志上,这体现了注意力分布场呈向变化点、向显著点的演变规律。在被试者面对多因素预警界面的表现上,分布式界面的注意力分配相对于聚集式界面而言较分散,这体现了注意力分布场趋大模块性、趋高对比度性和趋中心性的分布规律。通过对3种界面的场分析可以发现,优化后的聚集式界面和分布式界面不仅使被试者的认知分配集中在局部优化后的预警图标上,也可以良好地调整被试者认知负荷,从而正确处理多个预警预警发生的状况。

4.4 问卷结果

通过对试验后回收的25份有效问卷进行柱状图分析(图15),设计的问题答案为得分越高效果越差,通过图像量化分析发现,在被试者主观对界面评分方面,分布式布局界面和聚集式布局界面在美观、色彩和布局上都优于堆叠式界面。

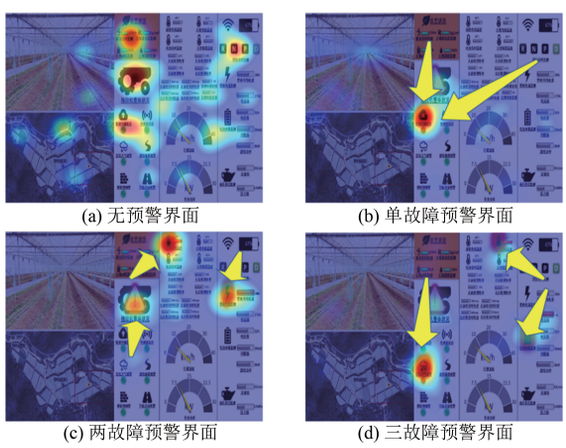
在被试者心理评分方面,分布式布局界面和聚集式布局界面效果远优于堆叠式界面,其中分布式布局被被试者的接受程度最高,聚集式界面其次,造成这种现象的原因是分布式布局通过松散地摆放大大减少了被试者的认知负荷,从而使被试者感到放松,但当预警发生时由于摆放过于松散反而使得被试者难以发现预警,这点从最高的界面焦虑程度可以发现。被试者在进行试验时平均认知负荷为46分,能进行良好的认知支配程度能力为40分,可以视作较为优秀的水平。问卷结果显示分布式布局界面综合得分(各项得分之和)310分,聚集式布局界面综合得分345分,堆叠式布局界面综合得分392分。其中聚集式布局界面比堆叠式布局界面分数降低11.99%,结果表明堆叠式界面的优化正确。



(a) 无预警界面　(b) 单故障预警界面　(c) 两故障预警界面　(d) 三故障预警界面

图 13　分布式界面场分析验证

Fig. 13　Distributed interface field analysis and verification



(a) 无预警界面　(b) 单故障预警界面　(c) 两故障预警界面　(d) 三故障预警界面

图 14　聚集式界面场分析验证

Fig. 14　Aggregated interface field analysis and verification

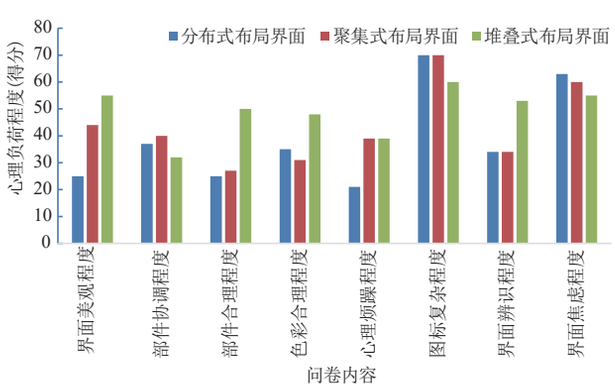


图 15　问卷结果分析

Fig. 15　Analysis of questionnaire result

5　结论

(1)堆叠式、分布式和聚集式界面在准确率、反应时间和注意力场分布方面有明显差别，对认知绩效具有显著影响。堆叠式界面相对于优化后的两种界面信息不够透明，由于没有图标进行显示导致远程监控界面无法有效表示预警情况，延缓了监控者的认知分配，加重了监控者的认知负荷。中高密集度的图标布局可以提高监控者搜寻预警情况的效率，低水平密度图标布局由于过于分散的布置反而会降低监控者认知分配效率，导致认知出现延迟情况，但这种情况对经验丰富的监控者是否适用仍待考证。通过对界面场分析的结果可以发现，优化了图标的界面可读性增强、易读性增大且认知分配增加，这也说明局部优化方案效果显著。

(2)试验结果表明，分布式无人电动拖拉机远程监控界面在单因素预警2 s内可被被试者发现预警的准确率相对于堆叠式界面提升9.54%，在4 s内发现所有预警的准确率提升16.26%，平均反应时间增加18.17%；两因素预警在2 s内可被被试者发现预警的准确率相对于堆叠式界面降低9.66%，在4 s内发现所有预警的准确率提升33.00%，平均反应时间(多因素预警选取最快发现预警的一组数据)增加15.12%；三因素预警情况在2 s内可被被试者发现预警的准确率相对于堆叠式界面降低10.00%，在4 s内发现所有预警的准确率提升43.00%，平均反应时间(多因素预警选取最快发现预警的一组数据)增加35.16%。

(3)设施电动拖拉机采用聚集式界面对于监控者反应准确性高、耗时短，工效最高并在多因素预警状况下表现稳定，因此更适用于设施电动拖拉机预警界面。聚集式界面单因素预警情况下2 s内准确率相对于堆叠式界面提升18.63%，4 s内准确率提升20.15%，总平均反应时增加0.099 7%；两因素预警在2 s内可被被试者发现预警的准确率相对于堆叠式界面提升9.34%，在4 s内发现所有预警的准确率提升48.67%，平均反应时间(多因素预警选取最快发现预警的一组数据)增加1.692%；三因素预警情况在2 s内可被被试者发现预警的准确率相对于堆叠式界面降低3.00%，在4 s内发现所有预警的准确率提升36.00%，平均反应时间(多因素预警选取最快发现预警的一组数据)降低8.59%。

参　考　文　献

[1]　赵博，张巍朋，苑严伟，等.农业装备运维与作业服务管理信息化技术研究进展[J].农业机械学报，2023，54(12)：1－26.
ZHAO Bo, ZHANG Weipeng, YUAN Yanwei, et al. Research progress in information technology for agricultural equipment maintenance and operation service management[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 1－26. (in Chinese)

[2]　窦汉杰，陈震宇，翟长远，等.果园智能化作业装备自主导航技术研究进展[J].农业机械学报，2024，55(4)：1－22.
DOU Hanjie, CHEN Zhenyu, ZHAI Changyuan, et al. Research progress on autonomous navigation technology for orchard intelligent equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 1－22. (in Chinese)

[3]　温生芳.基于智能感知技术的山旱地农机作业数据采集与分析研究[J].南方农机，2023，54(12)：32－34.

[4]　黄修炼，迟瑞娟，董乃希，等.基于Winform的农机导航终端监控系统设计与试验[J].农机化研究，2023，45(10)：115－120.
HUANG Xiulian, CHI Ruijuan, DONG Naixi, et al. Design and test of monitoring software system for agricultural machinery navigation

terminal based on Winform[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023,45(10):115 - 120.(in Chinese)
[5] 李继领.基于GIS的智能农机综合监管服务平台设计与实现[J].信息与电脑(理论版),2022,34(19):146 - 149.
LI Jiling. Design and implementation of intelligent agricultural machinery design and implementation of intelligent agricultural machinery [J]. Information & Computer,2022,34(19):146 - 149.(in Chinese)
[6] KOUSAR S ,SHAHID S ,ULLAH A, et al.Monitoring and control system for precision agriculture using wireless sensor network[J].Asian Journal of Research in Computer Science,2023,16(4):95 - 103.
[7] HAMZA B ,MOUNIR B ,REDA K, et al.Smart platform based on IoT and WSN for monitoring and control of a greenhouse in the context of precision agriculture[J].Internet of Things,2023,23: 100830.
[8] LUO C ,CHEN J ,GUO S , et al.Development and application of a remote monitoring system for agricultural machinery operation in conservation tillage[J].Agriculture,2022,12(9):1460.
[9] 刘涛.基于视觉注意机制下农机导航显示界面的设计[J].农机化研究,2024,46(11):110 - 115,190.
LIU Tao. Design of navigation display interface for agricultural machinery based on visual attention mechanism[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2024,46(11):110 - 115,190.(in Chinese)
[10] 陈驰航.数字化人机界面复杂度对人因失误的影响研究[J].价值工程,2024,43(8):163 - 165.
CHEN Chihang ,Study on the impact of digital human-machine interface complexity on human errors[J].Value Engineering,2024,43(8):163 - 165.(in Chinese)
[11] 季煜恒,李春通,骆晓萌,等.基于人因工程的船舶驾驶室人机界面布局优化设计[J].上海交通大学学报,2024,58(2):201 - 210.
JI Yuheng, LI Chuntong, LUO Xiaomeng, et al. Layout optimization design of human machine interface in wheelhouse based on ergonomics[J].Journal of Shanghai Jiaotong University,2024,58(2):201 - 210.(in Chinese)
[12] 谢凝,陈登凯,周垚,等.基于人因可靠性的民机驾驶舱人机界面评价方法[J].西北工业大学学报,2022,40(6):1250 - 1260.
XIE Ning ,CHEN Dengkai ,ZHOU Yao , et al.A method for evaluating human-machine interface in civil aircraft cockpit based on human factor reliability[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University,2022,40(6):1250 - 1260.(in Chinese)
[13] DONGBIN K ,OH PAUL Y.Human-embodied drone interface for aerial manipulation: advantages and challenges[J].Intelligent Service Robotics,2024,17(3):375 - 388.
[14] CHEN A, XIE F, WANG J, et al.Intelligent optimization method of human - computer interaction interface for UAV cluster attack mission[J].Electronics,2023,12(21): 4426.
[15] 刚春明.基于视觉认知特征的网课界面布局设计研究[J].包装工程,2024,45(2):209 - 215.
GANG Chunming. Layout design of online course interface based on visual cognitive features [J]. Packaging Engineering,2024,45(2):209 - 215.(in Chinese)
[16] 牛佳然,吴晓莉,张蓝,等.基于视觉认知特性的作战显控界面信息结构布局研究[J].包装工程,2023,44(22):328 - 337.
NIU Jiaran, WU Xiaoli , ZHANG Lan, et al.Information structure layout of combat display and control interfaces based on visual cognition characteristics[J].Packaging Engineering,2023,44(22):328 - 337.(in Chinese)
[17] 侯钰婷,夏进军.基于认知负荷理论的交互界面图标设计研究[J].工业设计,2023(6):27 - 30.
HOU Yuting , XIA Jinjun , Research on icon design of interactive interface based on cognitive load theory[J].Industrial Design,2023(6):27 - 30.(in Chinese)
[18] JIN T, LIU X, CHEN C, et al.The impact of environmental noise on drivers' cognitive abilities: a case study on in-vehicle voice interaction interfaces[J].Applied Ergonomics,2024,117: 104247.
[19] LIU X, LIU Z, ZHU S, et al.Human reliability assessment of ergonomic interaction design for engineering software based on Entropy - FTA - Delphi[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2020, 6(3): 04020035.
[20] LIM Y, GARDI A, SABATINI R, et al.Avionics human-machine interfaces and interactions for manned and unmanned aircraft[J]. Progress in Aerospace Sciences,2018,102:1 - 46.
[21] 中国农业大学.无人农机装备高工效远程监控干预界面试验系统1.0: 2024SR0846202[P]. 2024 - 06 - 21.
[22] PERRY J S, GEISLER W S.Gaze-contingent real-time simulation of arbitrary visual fields[J]. SPIE Human Vision and Electronic Imaging,2002,4662:57 - 69.
[23] 陈筱琳.虚拟现实环境下基于眼动的交互意图识别研究[D].北京:北京邮电大学,2024.
[24] 瞿珏,朱帅,王崴,等.自适应界面视觉搜索认知特性研究[J].电子学报,2021,49(2):338 - 345.
QU Jue, ZHU Shuai, WANG Wei, et al.Research on visual search cognitive characteristics of adaptive interface[J]. Acta Electronica Sinica,2021,49(2):338 - 345.(in Chinese)
[25] KWON S, PARK S, KIM J. Study on perceptible and acceptable ranges for color gamut of transparent displays[J]. Electronic Imaging, 2016,2016(13):1 - 6.
[26] 姚湘,龙茜,陈淇琪,等.载人航天人机交互界面色彩设计方法研究[J].包装工程,2024,45(4):16 - 32,13.
YAO Xiang, LONG Xi, CHEN Qiqi, et al. Color design methods for human-computer interaction interface in manned spaceflight[J]. Packaging Engineering,2024,45(4):16 - 32,13.(in Chinese)