北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

# 基于认知负荷的人机界面综合评价方法

陈鹤元 钟文博 杨洪泽 高嵩 杨宛萤 李博

# Comprehensive evaluation method of human-machine interface based on cognitive load: taking forest firefighting command vehicle display console as an example

Chen Heyuan, Zhong Wenbo, Yang Hongze, Gao Song, Yang Wanying, Li Bo

引用本文:
陈鹤元, 钟文博, 杨洪泽, 高嵩, 杨宛萤, 李博. 基于认知负荷的人机界面综合评价方法[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(6):141–151. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250070
Chen Heyuan, Zhong Wenbo, Yang Hongze, Gao Song, Yang Wanying, Li Bo. Comprehensive evaluation method of human–machine interface based on cognitive load: taking forest firefighting command vehicle display console as an example[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(6):141–151. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250070

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250070

**您可能感兴趣的其他文章**
**Articles you may be interested in**

背负式林果采摘机的人机工程学评价
Ergonomics evaluation of knapsack forest–fruit–picking machine
北京林业大学学报, 2017, 39(6): 131–136. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160329

仿山羊步态的林地底盘设计及仿真
Design and simulation of woodland chassis imitating goat gait
北京林业大学学报, 2021, 43(6): 152–162. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210086

一种林用主动步态底盘双缸轮腿越障及位置优化研究
Optimization on the obstacle crossing ability and position of a forestry chassis with double–cylinder wheeled–legs
北京林业大学学报, 2018, 40(6): 117–124. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180092

聚脲喷枪混合室的设计和FLUENT仿真分析
Mixing chamber design of polyurea spray airbrush and simulation analysis based on FLUENT
北京林业大学学报, 2017, 39(3): 105–111. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160254

国内外林区几种大型作业车辆研究进展及车型设计展望
Studies of several large–scale forestry operating vehicles at home and abroad and prospect of vehicle type design
北京林业大学学报, 2019, 41(6): 154–166. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190048

基于森林空间收获问题的模拟退火算法邻域搜索技术比较
Evaluating neighborhood search techniques of simulated annealing based on forest spatial harvest scheduling problems
北京林业大学学报, 2017, 39(8): 24–32. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170095

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250070

# 基于认知负荷的人机界面综合评价方法
## ——以森林消防指挥车显控台为例

陈鹤元[1]　钟文博[1]　杨洪泽[1]　高　嵩[1]　杨宛萤[1]　李　博[1,2]
（1. 东北林业大学家居与艺术设计学院，黑龙江 哈尔滨 150040；2. 东北林业大学机电工程学院，黑龙江 哈尔滨 150040）

**摘要:【目的】**显控台人机界面在复杂任务环境中普遍存在信息层级冗余和视觉搜索效率低等问题，导致操作员认知负荷过载，严重影响任务执行效率和操作安全性。针对这一现状，本研究提出一种基于认知负荷理论的主客观融合赋权综合评价方法，旨在通过优化显控台界面布局与信息呈现方式，降低操作员外在认知负荷，提升交互效率与任务执行效能，为复杂人机界面设计提供普适性方法论支持。**【方法】**为实现上述目标，本研究基于认知负荷理论与工效学原则，构建包含界面复杂度、视觉搜索效率、可达域覆盖率的多维评价体系。采用 BWM 法确定主观权重，并结合熵权法计算客观权重，通过主客观融合赋权模型融合主客观指标，运用模糊综合评价法对界面性能进行综合评价。通过 Jack 软件仿真分析显控台的可达域与可视域，并结合眼动实验、NASA-TLX 量表及任务绩效进行多维数据验证优化效果。实验以 12 名男性被试为对象，设计 11 项模拟任务，对比优化前后界面性能差异。**【结果】**优化后的界面显著提升了任务效率和准确性：主任务完成时间缩短至（122.42 ± 17.23）s，任务正确率提升至（95.45 ± 8.23）%。眼动实验分析表明，注视次数从 69.44 ± 12.35 减少至 56.24 ± 12.71，瞳孔扩张值从（4.03 ± 0.23）px 降低至（3.81 ± 0.28）px。此外，NASA-TLX 评分显著下降至 42.61 ± 4.54，模糊综合评分从 62.51 升至 78.10。这些结果直观地展示了优化设计在降低认知负荷和提升任务效率方面的显著成效。**【结论】**本研究通过实验验证了主客观融合赋权方法的有效性。该方法通过主客观权重融合与模糊逻辑分析，有效降低了操作员的外在认知负荷，并显著提升了任务效率，为高负荷作业场景下的人机界面优化设计提供了兼具科学性与适应性的方法论支持。

**关键词：**人机界面；认知负荷；多维评价；仿真；眼动实验；视觉搜索；显控台；森林消防指挥车
**中图分类号：**TB472　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2025)06−0141−11
**引文格式：**陈鹤元，钟文博，杨洪泽，等. 基于认知负荷的人机界面综合评价方法——以森林消防指挥车显控台为例［J］. 北京林业大学学报，2025，47(6)：141−151. Chen Heyuan, Zhong Wenbo, Yang Hongze, et al. Comprehensive evaluation method of human-machine interface based on cognitive load: taking forest firefighting command vehicle display console as an example［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(6): 141−151.

# Comprehensive evaluation method of human-machine interface based on cognitive load: taking forest firefighting command vehicle display console as an example

Chen Heyuan[1]　Zhong Wenbo[1]　Yang Hongze[1]　Gao Song[1]　Yang Wanying[1]　Li Bo[1,2]
(1. College of Home and Art Design, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

**Abstract:** ［**Objective**］ Display and control console human-machine interface (HMI) in complex task environments commonly exhibit issues such as redundant information hierarchies and low visual search efficiency, leading to cognitive overload for operators and seriously affecting task performance and

**收稿日期:** 2025−03−03　**修回日期:** 2025−05−31
**基金项目:** 国家重点研发计划（2022YFD2202100）。
**第一作者:** 陈鹤元。主要研究方向：林业装备的工业设计。Email：1960059735@qq.com　地址：150040 黑龙江省哈尔滨市和兴路 26 号东北林业大学家居与艺术设计学院。
**责任作者:** 李博，教授。主要研究方向：工业设计和人机工程。Email：9316762@qq.com　地址：同上。
**本刊网址:** http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

operational safety. To address this situation, this study proposes a comprehensive evaluation method based on cognitive load theory and the fusion of subjective and objective weights. It aims to reduce external cognitive load by optimizing interface layout and information presentation, improve interaction efficiency and task execution performance, and provide a universal methodological reference for complex HMI design. [**Method**] To achieve the above goal, a multidimensional evaluation system was constructed based on cognitive load theory and ergonomic principles, incorporating interface complexity, visual search efficiency, and reach envelope coverage. The BWM (best-worst method) was used to determine subjective weights, while the entropy method was applied to calculate objective weights. A fusion weighting model was employed to integrate subjective and objective indicators, and fuzzy comprehensive evaluation was conducted to assess interface performance. Jack software was used to simulate the reach and field of view of the console. Eye-tracking experiments, NASA-TLX scale, and task performance were used to validate the optimization effects with multidimensional data. Twelve male participants were recruited to perform 11 simulated tasks, and the interface performance before and after optimization was compared. [**Result**] The optimized interface significantly improved task efficiency and accuracy. The primary task completion time decreased to (122.42 ± 17.23) s, and accuracy increased to (95.45 ± 8.23)%. Eye-tracking data showed a reduction in fixation count from 69.44 ± 12.35 to 56.24 ± 12.71 and a decrease in pupil dilation from (4.03 ± 0.23) px to (3.81 ± 0.28) px. The NASA-TLX score dropped markedly to 42.61 ± 4.54, and the fuzzy comprehensive score rose from 62.51 to 78.10. These results clearly demonstrated the effectiveness of the optimized design in reducing cognitive load and enhancing task performance. [**Conclusion**] This study experimentally verifies the effectiveness of subjective-objective fusion weighting method. By integrating subjective and objective weights and applying fuzzy logic analysis, the method effectively reduces external cognitive load and significantly improves task performance. It provides a scientific and adaptable methodological approach for optimizing HMIs in high-load operational scenarios.

**Key words:** human-machine interface; cognitive load; multidimensional evaluation; simulation; eye movement experiment; visual search; display console; forest firefighting command vehicle

人机界面作为人与机器之间信息传递的媒介，其布局设计直接影响着人机关系的合理性与交互效率[1]。认知负荷指个体在执行任务或学习过程中为信息加工所消耗的心理资源[2]，通常被分为内在认知负荷、外在认知负荷和相关认知负荷，三者相互作用并保持动态平衡，增加某一类型的负荷可能导致其他负荷的降低，以维持整体稳定水平[3]。内在认知负荷取决于任务本身的复杂性，相关认知负荷与操作员学习和信息整合过程相关，外在认知负荷则受信息呈现方式、界面设计和数据可视化的影响[4]。在界面优化研究中，外在认知负荷尤为关键，因为它直接受到信息呈现方式和视觉搜索行为的影响[5]。研究表明，现有显控台设计普遍存在信息层级冗余[6]、功能模块布局分散等问题[7]，进一步加剧了操作员的视觉搜索负担与工作记忆压力[8]。在应急指挥场景中，这些缺陷进一步制约了决策的效率与准确性[9]。认知负荷理论作为优化复杂人机界面的重要理论基础，在船舶智能驾驶舱[10]、飞机座舱[11]及智能汽车座舱[12]等高负荷作业环境中得到了广泛应用。

国内外学者针对人机界面认知负荷优化问题进行了多角度探索。例如：陈磊等[13]提出了融合认知负荷的布局优化方法，并通过眼动实验验证了其有效性。该方法在主客观权重的动态调整方面仍有优化空间，因此在量化界面优化对认知负荷的影响时，可能存在一定局限性。刘琳等[14]使用 *K*-Means 算法评估界面可用性，主要聚焦于界面视觉分布特征。然而，该方法未能充分考虑信息层级和功能逻辑对认知负荷的潜在影响，可能对复杂人机界面的交互效率优化存在一定的局限性。基于因子分析[15]和灰色关联分析[16]优化钻机控制室设计，提升了任务执行效率，但其方法在动态任务情境下适应性不足，更适合相对稳定的作业环境。Lu 等[17]基于多维感知研究自动驾驶汽车界面优化，强调信息优先级管理对驾驶员认知负荷的影响，但在复杂任务环境下主客观权重的动态调整尚未得到充分关注。路易霖等[18]结合眼动数据与操作时间分析了不同环境下驾驶员的认知负荷差异，表明眼动追踪可用于量化操作员认知负荷，但在复杂人机界面优化中的应用仍有限。近年来，人机界面优化研究虽有进展，但在定量化评价方法的构建方面仍需进一步探索和完善。

尽管这些研究在各自领域显著提升了界面交互性能，但仍存在一些局限。现有方法多采用单一的优化策略或算法，未能完全实现多维度的融合分析，难以全面评估界面优化的综合效果。认知负荷的量化评估标准尚未充分统一，导致不同研究间的可比性较低，限制了优化方法的普适性。此外，大多数研究聚焦于特定任务场景，缺乏可推广的人机界面综合评价框架，难以适应复杂作业环境下的认知负荷优化需求。

为解决上述问题，本研究以认知负荷理论为基础，拟提出一种主客观融合赋权与模糊逻辑相结合的综合评价框架。通过整合最佳最差法（best-worst method，BWM）与熵权法，旨在解决主客观权重配比的难题；同时，借助模糊综合评价方法量化界面性能的模糊性与不确定性，以实现多维指标的系统分析。在实验部分，拟结合眼动追踪数据与 NASA-TLX 评分，从多维度验证优化设计对认知负荷的调控效果。本研究以森林消防指挥车显控台为对象，通过仿真分析与实验验证，明确优化设计对认知负荷的调控机制，为复杂装备人机界面设计提供理论支撑。

# 1　综合评价方法的构建

## 1.1　评价指标的选取

显控台是指挥员与车载设备进行信息传递和操作的主要通道，其人机界面的可用性影响操作效率和任务成效。设计时需考虑指挥员的认知能力和生理特性。本研究结合认知负荷和工效学理论，研究指挥员的视觉特性、生理尺寸、作业舒适度和认知负荷控制策略，提出适用的设计原则。

### 1.1.1　基于认知负荷的显控台人机评估指标

在长时间操作过程中，指挥员可能会面临认知过载以及界面操作复杂等问题。在设计人机界面布局时，降低操作人员的认知负荷至关重要[19]。提升显控台人机界面的认知效能，核心在于最大限度降低干扰用户认知活动的外在认知负荷，同时优化与任务相关的认知负荷，从而释放更多认知资源用于知识吸收和图式构建，进而显著提高指挥员的信息处理效率。外在认知负荷的主要来源在于显控台界面的信息呈现方式。通过利用注意分散效应、冗余效应[20]、通道效应[21]等认知负荷效应，优化界面内信息材料组织与呈现，减少不利于指挥员界面理解的心理活动和认知资源消耗。认知负荷优化策略建议减少外在认知负荷，提高相关认知负荷比例，从而提升信息加工效率，避免认知负荷过载[3]。外在认知负荷主要受信息元素的布局和呈现方式影响。因此，在界面布局设计中，应重点关注降低外在认知负荷的策略[1]。具体原则如表 1 所示。

### 1.1.2　基于人机工程学的显控台人机评估指标

在显控台界面设计中，人机工程学要求不仅要考虑显控台的可达性，还要注重操作姿势的舒适性。视觉特性原则要求根据指挥员的视觉特性对显控台界面进行科学划分。随着视野范围的扩大，人眼对视觉信号的感知敏锐度逐渐下降。应以视野中心为最佳布局点，优先级越高的元件应放置在视觉感知更敏锐的位置，以实现快速、准确操作和监控，减少无效的心理活动和认知负荷，因此本研究将显控台关键元件的可视域覆盖率作为核心评估指标。舒适性原则强调按照指挥员的上肢可达范围和作业舒适性进行元件布置。应将使用频率和重要性高的元件优先安排在最佳位置，以降低人机交互的复杂性，保障操作过程中的舒适性，避免疲劳。基于该原则选取可达域覆盖率与操作姿势舒适度作为关键量化指标。

综上所述，显控台界面布局应基于认知负荷和人机工程学原则，通过科学划分界面空间、合理布局信息元素及优化组织架构，提升操作效率和准确性，减少认知负荷和身体疲劳，确保高效的人机交互。

## 1.2　主客观融合赋权模型构建

为克服传统赋权方法的局限性，本研究提出一种 BWM–熵权法融合的主客观融合赋权模型。BWM 法和熵权法是两种常用的评价权重确定方法。BWM 法是荷兰学者 Rezaei 于 2014 年提出的一种确定指标主观权重的新方法[25]。在主客观融合赋权模型中的主要作用是通过专家的主观判断来进行权重评估，能够高效地减少主观偏差，其计算步骤简洁且准确，适合在样本量较小或计算资源有限的情

**表 1　显控台人机界面认知负荷优化设计原则**

Tab. 1　Design principles for optimizing cognitive load in display and control console human-machine interface

| 设计原则 | 说明 | 指标 | 效果 |
|---|---|---|---|
| 降低界面复杂程度 | 简化信息层级和复杂性，紧密排列相关元素以减少外在认知负荷[22] | 主任务时间、正确率、可达域 | 减少认知过载，提升效率 |
| 视觉搜索规律布局 | 高频/重要元件部署于视觉优势区域，提升定位效率[23] | 注视时间、注视次数、瞳孔扩张 | 提高搜索效率 |
| 优化界面组织架构 | 操作与反馈邻近布局，功能模块化减少认知资源消耗 | 次任务正确率、眨眼率、可视域 | 降低负荷 |
| 操作程序分配布局 | 按操作连续性排布元件，减少路径中断[24] | NASA-TLX评分 | 提升流畅性 |

况下应用。而熵权法基于信息熵原理，通过分析各指标的信息熵确定权重，反映每个指标在总体评价中的贡献度[26]。尽管 BWM 法能够有效减少主观偏差，但在复杂系统中特别是当涉及多个相关指标时，单纯依赖专家意见可能无法全面反映实际数据的变异性。因此引入了熵权法来从数据的客观角度进一步调整权重。

首先，采用 BWM 法确定主观权重。设评价指标集 $Y=\{y_1,y_2,\cdots,y_m\}$，其中 $y_i$ 为第 $i$ 个评价指标，$m$ 为指标的总数。设专家选出的最佳指标(即专家认为最重要的)为 $y_b$，最差指标(即专家认为最不重要的)为 $y_c$。接着，进行重要性对比，将最佳指标 $y_b$ 与其他指标 $y_i$ 进行两两比较，得到比较向量 $\boldsymbol{D}_B=\{D_{B1},D_{B2},\cdots,D_{Bm}\}$，其中 $D_{Bi}\in[1,\ 9]$，表示最佳指标 $y_b$ 相对于其他指标 $y_i$ 的重要性程度；若 $y_b$ 与 $y_i$ 重要性相当，则 $D_{Bi}=1$，同样 $D_{Bb}=1$。然后，进行最差指标对比，将其他指标 $y_i$ 与最差指标 $y_c$ 进行两两比较，得到比较向量 $\boldsymbol{D}_C=\{D_{C1},D_{C2},\cdots,D_{Cm}\}$，其中 $D_{Ci}\in[1,9]$，表示其他指标 $y_i$ 相对于最差指标 $y_c$ 的重要性程度，同样 $D_{Cc}=1$。最后，根据 BWM 法建立优化模型式(1)，通过最小化一致性误差 $\xi$ 求解各指标的权重向量 $\boldsymbol{\delta}_i=\{\delta_1,\delta_2,\cdots,\delta_m\}$。

$$\text{目标函数}:\min\xi$$

$$\text{约束条件}:\begin{cases}\left|\dfrac{\delta_b}{\delta_i}-D_{Bi}\right|\leqslant\xi,\ i=1,2,\cdots,m\\ \left|\dfrac{\delta_i}{\delta_c}-D_{Ci}\right|\leqslant\xi,\ i=1,2,\cdots,m\\ \sum_{i=1}^{m}\delta_i=1\\ \delta_i\geqslant 0,\ i=1,2,\cdots,m\end{cases}\tag{1}$$

式中：$\delta_b$ 是最佳指标 $y_b$ 的权重，$\delta_c$ 是最差指标 $y_c$ 的权重，$\delta_i$ 是其他指标 $y_i$ 的权重。

利用式(2)计算一致性比率，若一致性比率 < 0.1，则计算结果通过一致性检验；若一致性比率≥ 0.1，则计算结果未通过一致性检验。

$$C_R=\frac{\xi^*}{C_I}\tag{2}$$

式中：$C_R$ 是一致性比率，$\xi^*$ 是优化得到的最小一致性误差，$C_I$ 是一致性指标。

接下来，采用熵权法确定客观权重。首先对数据矩阵进行标准化处理，假设存在 $m$ 个评价指标和 $n$ 个评价对象，其原始数据矩阵为

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}x_{11}&\cdots&x_{1n}\\ \vdots&&\vdots\\ x_{m1}&\cdots&x_{mn}\end{bmatrix}\tag{3}$$

原始数据矩阵中可能存在正向指标和逆向指标，将所有数据进行正向化处理和归一化处理，对矩阵进行标准化处理后得到如下矩阵。

$$U=\left(u_{ij}\right)_{m*n}\tag{4}$$

式中：$u_{ij}$ 是第 $j$ 个评价对象的第 $i$ 个评价指标上的标准值，$u_{ij}\in[0,1]$。

计算各指标的信息熵，根据信息论中的定义，指标 $i$ 的信息熵($Q_i$)可被定义为

$$\begin{aligned}&Q_i=-\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{n}f_{ij}\ln f_{ij},\\ &f_{ij}=-\frac{u_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}u_{ij}},\ i=1,2,\cdots,m,\ j=1,2,\cdots,n\end{aligned}\tag{5}$$

在得到信息熵后，计算各指标的权重($w_i$)。

$$w_i=\frac{1-Q_i}{m-\sum_{i=1}^{m}Q_i},\ i=1,2,\cdots,m\tag{6}$$

对熵值法得出的权重和 BWM 法得出的权重进行加权计算，得出各评价指标的最终权重。

$$\theta_1=\lambda_1 w_i+\lambda_2\delta_i\tag{7}$$

式中：$\lambda_1,\lambda_2$ 为权重系数，$\lambda_1+\lambda_2=1$，且 $\lambda_1>0$，$\lambda_2>0$。

### 1.3 模糊综合评价法

模糊综合评价法综合考虑多个因素和指标的模糊性和不确定性，可将定性评价转化为定量评价，能够实现对受多种因素影响的事物做出客观、全面的评价[27]，有效地量化和评估界面布局的优劣。步骤如图 1 所示。

首先，确定因素集、评语集和权重向量。因素集 $\boldsymbol{U}=\{u_1,u_2,\cdots,u_m\}$，表示评价对象的 $m$ 个待评价指标的集合，其中 $u_i$ 表示第 $i$ 个评价因素，$i=1,2,\cdots,m$；

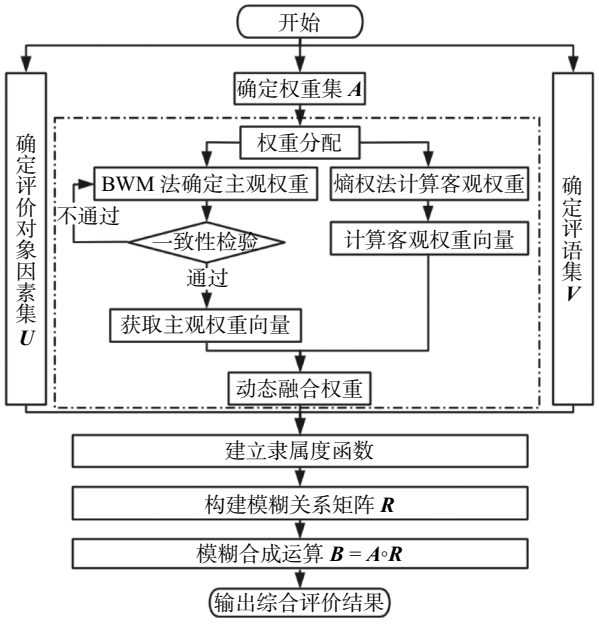



图 1 模糊综合评价步骤

Fig. 1 Steps of fuzzy comprehensive evaluation

评语集$\boldsymbol{V}=\{v_1,v_2,\cdots,v_m\}$，表示待评价因素各种评价结果的集合，其中$v_j$代表第$j$个评价结果，$j=1,2,\cdots,n$；权重向量$\boldsymbol{A}=\{a_1,a_2,\cdots,a_m\}$，表示评价对象的$m$个待评价指标所对应的权重，其中$a_i$表示为第$i$个评价因素的权重，$i=1,2,\cdots,m$。在模糊集理论中，隶属度函数是用于描述元素属于某个模糊集合的程度，取值范围通常在 0 到 1 之间，表示元素属于某个模糊集合的程度。梯形隶属度函数通过调整上底、下底以及上升和下降的斜率，灵活地描述了变量隶属于某个模糊集合的程度，以便定量化地描述评价对象对不同评价结果的归属程度[28]。对每个评价因素$u_i$进行单因素模糊评价，得出其对各个评价结果$v_j$的隶属程度，形成单因素评价矩阵$\boldsymbol{r}_{ij}=\begin{bmatrix} r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{in} \end{bmatrix}$，式中$r_{ij}$表示评价对象的因素$u_i$对$v_j$等级模糊子集的隶属度。将各个评价因素的单因素评价矩阵组合成模糊关系矩阵$\boldsymbol{R}=\left(r_{ij}\right)_{m*n}=\begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$。最后结合单因素评价矩阵与其权重，计算出最终的模糊综合评价结果。利用模糊矩阵合成原理，结合权重向量$\boldsymbol{A}$和模糊关系矩阵$\boldsymbol{R}$，计算出总的综合评价向量$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{A}\circ\boldsymbol{R}$（式中∘为算子符号）。

## 2　森林消防指挥车显控台综合评价验证

### 2.1　仿真验证

森林消防指挥车承担着林火扑救过程中前线消防员与指挥中心间的通讯及数据传输任务，其显控台功能繁复[29]。为了快速验证改进效果，使用人机工程学仿真软件 Jack 对优化前后的森林消防指挥车显控台界面进行可达域、可视域及舒适度分析[30]。仿真环境分为数字人与显控台两部分，利用 Jack 软件内置数据库创建中国成年男性数字人模型，选用身高和体重位于中位数的数据，然后用 Rhino 软件对森林消防车显控台进行三维建模，并将模型导入 Jack 软件中完成环境准备工作。

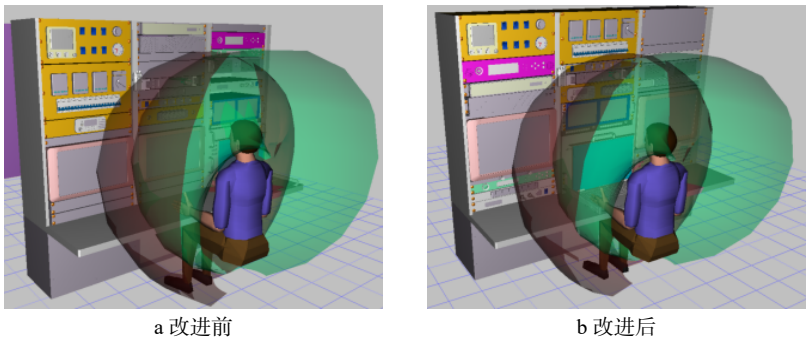
仿真任务包括可达域分析、可视域分析以及舒适度分析。使用 Jack 软件中的 Reach Zone 和 Visual Fields 模块，分析指挥员在工作姿势下的可达域和可视域。由于显控台界面空间范围较大，因此在可达域分析中选用腰部驱动模式，在可视域分析中选用最大可视范围进行分析，得到改进前后显控台界面可达域和可视域分析结果（图 2）。通过 Jack 软件的 Dreyfuss 3D 工具，评估指挥员与显控台界面交互时的关节舒适度。由于指挥员在与显控台交互过程中涉及多种动作，因此选择指挥员坐姿工作场景下的两种典型任务进行舒适度分析，分别是切换屏幕信号源和切换卫星频段，舒适度评价过程如图 3 所示。

通过对仿真结果的分析（图 2），对比改进前后的显控台界面，发现尽管改进后的界面仍无法覆盖所有元件在指挥员的可达域和可视域内，但改进后的界面包含更多元件，并覆盖了高使用频率和重要的元件。此外，舒适度分析（图 3）显示，优化后的界面更符合人体工程学要求，进一步证明其满足工效学标准。

### 2.2　实验验证

#### 2.2.1　实验设计

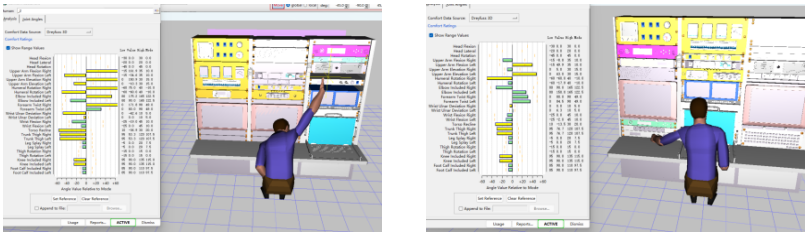
本研究通过实验获取不同被试在森林消防指挥车显控台界面优化前后的客观绩效表现、认知负荷水平和主观评价数据，并进行统计和分析，以探究界面优化的有效性。本次实验使用了 TOBII Pro Glasses 3 穿戴式眼动仪和移动式工作站，配备了 Glasses 3 数据记录平台和 Ergolab 数据分析平台。考虑到森林消防指挥员中男性居多，选取了东北林业大学机电工程学院的 12 名男性研究生作为实验被试。所有被试的视力和听力正常，且均为右利手。实验采用双任务绩效实验的方式评估界面优化效果。主任务涵盖的显控台所有功能模块如表 2 所示，次任务要求被试随鼓点清晰的纯音乐节奏敲击，以最小干扰评估双任务绩效。



a 改进前　　b 改进后

图 2　森林消防指挥车显控台可达域分析

Fig. 2　Analysis on forest firefighting command vehicle console reachability



a 改进前　　b 改进后

图 3　森林消防指挥车显控台切换卫星频段源舒适度分析

Fig. 3　Comfort analysis of switching satellite band sources in forest firefighting command vehicle display console

**表 2　实验任务描述**

Tab. 2　Description of experimental tasks

| 编号 | 任务描述 |
|---|---|
| 1 | 调节无线麦克“Chanel 4”音量，确保背景音乐清晰可听 |
| 2 | 利用KVM一体机保存视频资料，并检查硬盘录像机状态 |
| 3 | 调整车载4K摄像机至左侧场景清晰可见 |
| 4 | 将卫星通信频段从Ka切换至Ku，切换卫星极化方式，检查Ku卫星调制解调器状态 |
| 5 | 利用KVM一体机切换中继节点，并利用音频设备下达指令 |
| 6 | 检查发电机工作状态以及剩余油量 |
| 7 | 检查UPS电源工作参数是否处于正常范围 |
| 8 | 利用高清矩阵切换显示器显示内容 |
| 9 | 针对显示器，进行警觉性测试 |
| 10 | 打开远程应急广播系统，插入USB闪存盘播放音频 |
| 11 | 利用KVM一体机在指挥平台更新火情标注 |

注：KVM一体机（keyboard-video-mouse integrated device）是集成显示器、键盘、鼠标和切换器功能的硬件设备。

为减少被试的主观偏见和心理暗示影响，实验结束后才向被试透露其参与的界面类型（改进前对照组或改进后优化组）。为避免熟悉度影响，优化组和对照组中界面顺序会随机调整[31]。由于被试缺乏森林消防指挥的相关背景知识，在实验开始前对其进行培训，包括界面元件和实验任务流程的介绍。实验过程中，主试记录被试的次任务错误次数、主任务完成时间和正确率，同时眼动仪记录被试的眼动数据。所有实验任务结束后，被试填写 NASA-TLX 量表。主试负责更换界面布局，进行另一组界面布局的实验。

### 2.2.2　信效度检验

为了保证 NASA-TLX 量表得出数据可信度，本研究采用克朗巴赫系数$\alpha$对量表结果进行信度分析[32]。

$$\alpha = \frac{N}{N-1}\left(1-\frac{\sum_{i=1}^{N}\sigma_i^2}{\sigma^2}\right) \tag{8}$$

式中：$N$表示量表的题目数量，$\sigma^2$表示总分数的方差，$\sigma_i^2$各个题目方差之和。

$\alpha$的取值范围为 [0, 1]，值越大表示量表的内部一致性越好。通常，0.7 以上的值表示内部一致性较好。本次量表的信度克朗巴赫系数$\alpha$为 0.798 3，证明量表信度良好。

为验证 NASA-TLX 量表的效度，采用配对样本 $t$ 检验分析优化前后主观评分差异，判断量表能否有效反映认知负荷变化。

$$t = \frac{\overline{D}}{S_{\mathrm{D}}/\sqrt{n}} \tag{9}$$

式中：$\overline{D}$为配对差值均值，$S_{\mathrm{D}}$为配对差值标准差，$n$为样本数。

配对样本 $t$ 检验结果表明，优化后被试评分显著下降（$t = 9.26$，$p < 0.001$），说明 NASA-TLX 能够敏感捕捉操作负荷变化，具备良好的实验效度。进一步计算效应量（$d$）。

$$d = \frac{\overline{D}}{S_{\mathrm{D}}} \tag{10}$$

计算结果显示：效应量为 2.673，远高于效应标准。这表明优化方案显著降低了认知负荷，同时也验证了 NASA-TLX 量表在本研究中的良好效度。

### 2.2.3　综合评价结果

利用 Ergolab 软件对眼动评价指标数据进行处理分析，包括 12 名被试的瞳孔扩张、眨眼率、注视时间和注视次数数据。同时对被试的主任务成功率、完成时间和次任务错误率进行记录和计算。结合 NASA-TLX 得分，得到评价指标数据（表 3）。

利用式 7 对各指标进行组合赋权，通过专家咨询法确定 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$，得出最后的权重系数 $\boldsymbol{A}$ = {0.123 3, 0.176 8, 0.151 0, 0.089 4, 0.0121 9, 0.145 4, 0.095 6, 0.095 6}。

建立评语集 $\boldsymbol{V}$ = {优秀，良好，中等，及格，差}，对应的分值为{90, 80, 70, 60, 50}。设 $x$ 为某评价指标的值，确定各隶属函数的 5 个关键节点（$a$、$b$、$c$、$d$、$e$），用于评语集 $\boldsymbol{V}$ 中 5 个等级的边界划分。

$$a = \frac{x_{\min}+b}{2},\ b = \overline{x}-\frac{3\sigma}{\sqrt{n}},\ c = \overline{x},\ d = \overline{x}+\frac{3\sigma}{\sqrt{n}},\ e = \frac{x_{\max}+b}{2} \tag{11}$$

式中：$\sigma$为评价指标标准差，$n$为样本数量。

将表 3 测得数据代入相应的隶属度函数中进行

**表 3　评价指标数据**

Tab. 3　Evaluation index data

| 被试 | NASA-TLX评分 | | 主任务完成时/s | | 主任务正确率/% | | 次任务正确率/% | | 眨眼率/(次·min$^{-1}$) | | 瞳孔扩张/px | | 注视时间/s | | 注视次数 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 改进前 | 改进后 | 改进前 | 改进后 | 改进前 | 改进后 | 改进前 | 改进后 | 改进前 | 改进后 | 改进前 | 改进后 | 改进前 | 改进后 | 改进前 | 改进后 |
| 被试1 | 59.333 3 | 31.666 7 | 159 | 130 | 63.6 | 100.0 | 91.7 | 95.8 | 13.316 7 | 19.283 3 | 3.92 | 3.88 | 52.61 | 51.82 | 232 | 199 |
| 被试2 | 60.000 0 | 44.000 0 | 160 | 101 | 72.7 | 90.9 | 93.1 | 95.8 | 18.783 3 | 18.983 3 | 3.78 | 3.71 | 91.83 | 62.22 | 326 | 224 |
| 被试3 | 74.666 7 | 42.333 3 | 126 | 117 | 72.7 | 100.0 | 94.4 | 97.2 | 16.083 3 | 21.483 3 | 3.79 | 3.63 | 64.61 | 43.91 | 272 | 187 |
| 被试4 | 63.666 7 | 39.000 0 | 154 | 139 | 90.9 | 90.9 | 98.6 | 100.0 | 14.033 3 | 19.316 7 | 4.11 | 3.55 | 58.31 | 42.98 | 235 | 193 |
| 被试5 | 66.000 0 | 42.333 3 | 117 | 112 | 81.8 | 100.0 | 98.6 | 100.0 | 11.866 7 | 15.983 3 | 4.37 | 4.25 | 62.89 | 36.10 | 239 | 161 |
| 被试6 | 65.666 7 | 39.666 7 | 154 | 89 | 90.9 | 72.7 | 97.2 | 98.6 | 10.566 7 | 16.466 7 | 4.21 | 3.98 | 65.49 | 60.71 | 279 | 241 |
| 被试7 | 65.333 3 | 45.333 3 | 159 | 133 | 63.6 | 100.0 | 95.8 | 97.2 | 15.983 3 | 18.966 7 | 3.86 | 3.64 | 94.16 | 78.19 | 355 | 294 |
| 被试8 | 66.000 0 | 48.666 7 | 162 | 155 | 72.7 | 100.0 | 94.4 | 97.2 | 13.966 7 | 23.300 0 | 4.29 | 3.91 | 66.13 | 70.17 | 291 | 254 |
| 被试9 | 69.666 7 | 41.666 7 | 140 | 123 | 90.9 | 100.0 | 98.6 | 98.6 | 13.616 7 | 21.650 0 | 4.16 | 4.25 | 66.03 | 57.61 | 280 | 227 |
| 被试10 | 52.333 3 | 45.666 7 | 166 | 118 | 72.7 | 100.0 | 100.0 | 98.6 | 15.533 3 | 22.766 7 | 3.66 | 3.45 | 76.29 | 62.56 | 309 | 279 |
| 被试11 | 62.000 0 | 43.000 0 | 168 | 125 | 100.0 | 100.0 | 95.8 | 95.8 | 16.266 7 | 16.450 0 | 4.27 | 3.46 | 67.83 | 65.35 | 272 | 249 |
| 被试12 | 56.666 7 | 48.000 0 | 151 | 127 | 63.6 | 90.9 | 94.4 | 97.2 | 12.550 0 | 16.066 7 | 3.97 | 3.95 | 67.12 | 43.23 | 245 | 182 |

判断，得到 12 名被试改进前后两种设计方案的 24 个模糊评价矩阵。采用加权平均算法对显控台界面进行模糊综合评价，得到表 4 中的结果。

根据表 4 的模糊综合评价结果，计算改进前后森林消防指挥车显控台人机界面的模糊综合评价结果平均值。原始界面的综合模糊评估得分为 62.51，而改进后界面的得分为 78.10。改进后界面的评估结果显著优于原始界面，表明改进的森林消防指挥车显控台人机界面优于原始设计。这验证了本文提出的设计方法的可行性。

## 3　讨　　论

本研究通过对比优化前后的数据，全面评估了优化设计对任务执行效率和认知负担的影响。表 5 显示优化设计在多个方面显著提升了任务表现。为确保数据分析的有效性，本研究进行了 Shapiro-Wilk 正态性检验，结果表明数据差值符合正态分布，满足了配对样本 $t$ 检验的前提条件。进一步的变异系数分析表明，改进后的界面设计虽然增加了主任务完成时间和注视时间的波动性，但有效减少了

**表 4　森林消防指挥车显控台人机界面模糊综合评价结果**

Tab. 4　Fuzzy comprehensive evaluation results of human-machine interface of display and control console of forest fire-fighting command vehicle

| 被试 | V1 | | V2 | | V3 | | V4 | | V5 | | 评价结果 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 改进前 | 改进后 | 改进前 | 改进后 | 改进前 | 改进后 | 改进前 | 改进后 | 改进前 | 改进后 | 改进前 | 改进后 |
| 被试1 | 0.000 | 0.317 | 0.125 | 0.330 | 0.259 | 0.304 | 0.246 | 0.049 | 0.370 | 0.000 | 61.389 | 79.143 |
| 被试2 | 0.000 | 0.177 | 0.166 | 0.447 | 0.141 | 0.327 | 0.232 | 0.049 | 0.460 | 0.000 | 60.142 | 77.509 |
| 被试3 | 0.000 | 0.531 | 0.180 | 0.395 | 0.364 | 0.073 | 0.244 | 0.000 | 0.211 | 0.000 | 65.133 | 84.578 |
| 被试4 | 0.000 | 0.480 | 0.207 | 0.226 | 0.281 | 0.274 | 0.503 | 0.020 | 0.008 | 0.000 | 66.873 | 81.668 |
| 被试5 | 0.011 | 0.518 | 0.275 | 0.220 | 0.260 | 0.090 | 0.127 | 0.048 | 0.327 | 0.125 | 65.160 | 79.590 |
| 被试6 | 0.000 | 0.246 | 0.070 | 0.175 | 0.297 | 0.378 | 0.389 | 0.143 | 0.245 | 0.058 | 61.908 | 74.072 |
| 被试7 | 0.000 | 0.200 | 0.037 | 0.333 | 0.239 | 0.277 | 0.246 | 0.152 | 0.478 | 0.037 | 58.337 | 75.069 |
| 被试8 | 0.000 | 0.274 | 0.000 | 0.074 | 0.078 | 0.419 | 0.452 | 0.233 | 0.469 | 0.000 | 56.090 | 73.884 |
| 被试9 | 0.000 | 0.301 | 0.134 | 0.409 | 0.352 | 0.151 | 0.375 | 0.014 | 0.139 | 0.125 | 64.819 | 77.487 |
| 被试10 | 0.114 | 0.419 | 0.134 | 0.348 | 0.185 | 0.168 | 0.269 | 0.065 | 0.298 | 0.000 | 64.971 | 81.211 |
| 被试11 | 0.151 | 0.296 | 0.000 | 0.236 | 0.259 | 0.384 | 0.268 | 0.084 | 0.322 | 0.000 | 63.900 | 77.452 |
| 被试12 | 0.000 | 0.191 | 0.014 | 0.221 | 0.383 | 0.539 | 26.000 | 0.048 | 0.276 | 0.000 | 61.352 | 75.551 |

注：V1、V2、V3、V4、V5分别对应模糊语言评价集中的差、及格、中等、良好、优秀等级。

**表 5 优化设计前后各指标的描述性统计与正态性检验结果**

Tab. 5 Descriptive statistics and normality test results of indices before and after optimization design

| 指标 | NASA-TLX评分 | | 主任务完成时间/s | | 主任务正确率/% | | 次任务正确率/% | | 眨眼率/(次·min$^{-1}$) | | 瞳孔扩张/px | | 注视时间/s | | 注视次数 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 优化前 | 优化后 | 优化前 | 优化后 | 优化前 | 优化后 | 优化前 | 优化后 | 优化前 | 优化后 | 优化前 | 优化后 | 优化前 | 优化后 | 优化前 | 优化后 |
| 均值±标准差 | 63.44±5.93 | 42.61±4.54 | 151.33±15.85 | 122.42±17.23 | 78.01±12.55 | 95.45±8.23 | 96.05±2.56 | 97.67±1.50 | 14.38±2.26 | 19.23±2.63 | 4.03±0.23 | 3.81±0.28 | 69.44±12.35 | 56.24±12.72 | 277.92±38.16 | 224.17±40.94 |
| CV | 9.34% | 10.66% | 10.47% | 14.08% | 16.09% | 8.62% | 2.67% | 1.54% | 15.68% | 13.68% | 5.78% | 7.27% | 17.79% | 22.61% | 13.73% | 18.26% |
| *W* | 0.957 | 0.967 | 0.802 | 0.961 | 0.895 | 0.902 | 0.918 | 0.905 | 0.912 | 0.800 | 0.961 | 0.960 | 0.918 | 0.887 | 0.880 | 0.840 |
| *p*值 | 0.796 | 0.870 | 0.061 | 0.825 | 0.346 | 0.389 | 0.492 | 0.404 | 0.451 | 0.059 | 0.826 | 0.823 | 0.493 | 0.305 | 0.270 | 0.129 |

注：Shapiro-Wilk正态性检验的统计量值记为*W*，其取值范围为[0, 1]。*W*值越接近1，表明数据越接近正态分布。

瞳孔扩张和注视次数的波动性，这进一步证实了优化设计在减轻认知负担方面的积极效果。优化设计显著改善了主任务完成时间、主任务正确率、注视次数和注视时间（表 6），进一步验证了其在提升任务效率和准确性方面的显著优势。

与现有研究相比，本研究在评估方法、指标维度及融合策略等方面进行了创新。许多相关文献主要集中在任务表现的静态评估，较少涉及认知负荷的综合评估（表 7）。本研究提出了一种更加全面的评估框架：结合 BWM–熵权法与模糊综合评价法，建立多维量化指标体系，涵盖任务绩效、眼动数据、NASA-TLX 评分等，从而提高优化效果的评估精度，克服传统评估方法中单一维度数据使用的局限性。此外，本研究采用的主客观融合赋权模型在界面设计优化过程中，弥补了传统方法在处理复杂因素和多维数据融合方面的不足，增强了评估框架的适应性和可靠性。

通过对比改进前后数据，本研究所构建的主客观融合赋权模型显著降低了操作员的认知负荷，这一结论得到了眼动实验结果的进一步验证，证实了模型在实际界面优化中的应用效果。相较于传统火灾监测系统的界面交互设计，本研究通过功能逻辑重组与视觉搜索规律适配，显著提升了高复杂度任务的执行效率。此外，结合眼动注视时间减少及瞳孔扩张值降低等数据，进一步证实了多源信息整合时认知冲突的缓解。

这一系列优化成果表明，本研究为高负荷森林消防作业场景提供了兼具理论严谨性与实践适用性

**表 6 优化设计对各指标的影响（配对样本 *t* 检验与效应量分析）**

Tab. 6 Effects of optimization design on each index (paired samples *t*-test and effect size analysis)

| 指标 | NASA-TLX评分 | 主任务完成时间/s | 主任务正确率/% | 次任务正确率/% | 眨眼率/(次·min$^{-1}$) | 瞳孔扩张/px | 注视时间/s | 注视次数 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 95% CI | [15.88, 25.79] | [15.94, 41.89] | [−28.03, −6.85] | [−2.59, −0.64] | [−6.64, −3.05] | [0.068, 0.39] | [6.31, 20.10] | [38.14, 69.36] |
| Cohen's *d* | 2.673 | 1.416 | 1.046 | 1.050 | 1.714 | 0.906 | 1.216 | 2.188 |
| *t* | 9.260 | 4.905 | 3.624 | 3.639 | 5.936 | 3.139 | 4.213 | 7.579 |
| *p*值 | 0.000 002 | 0.000 5 | 0.004 0 | 0.003 9 | 0.000 1 | 0.009 4 | 0.001 5 | 0.000 01 |

注：95% CI表示该指标在95%的置信水平下的估计区间；Cohen's *d*表示衡量组间差异的效应量，数值越大表示差异越显著。

**表 7 本研究与其他研究成果对比**

Tab. 7 Comparison of this study and other research results

| 文献 | 研究维度 | 研究方法 | 结果 | 评价指标 | 特点与优势 |
|---|---|---|---|---|---|
| [33] | 飞行编队信息呈现 | 模式评估 | 提升飞行效率 | 飞行效率与认知负荷 | 界面优化与任务效率 |
| [34] | 高铁操控台布局 | 注意力分析 | 降低认知负荷与提升效率 | 操作效率与认知负荷 | BWM–熵权法与模糊评价 |
| [35] | 复杂人机界面 | 任务实验 | 双任务绩效提升 | 双任务效率与完成时间 | 认知负荷评估 |
| [36] | 多指标决策 | 德尔菲法、AHP | 提出多指标模型 | 界面质量与决策效果 | 数据交叉验证 |
| [37] | 林区作业车辆 | 车辆分析 | 提升适应性与机动性 | 适应性与机动性 | 设备优化 |
| [38] | 三维监控系统 | 3S技术、信息集成 | 增强响应与监控能力 | 响应速度与操作效率 | 信息布局优化 |
| [39] | 火灾监测系统 | SuperMap技术 | 缩短任务时间与提高响应 | 响应时间与准确性 | 任务效率提升 |
| [40] | 火灾风险评估 | GIS模糊层次法 | 精确评估风险区域 | 风险评估精度 | 权重融合与仿真 |
| [41] | 林火风险预测 | 机器学习 | 提高预测准确性 | 预测准确度 | 界面优化与负荷控制 |

的解决方案。尽管本研究在多维融合与方法集成方面取得了进展,但仍存在一些局限性,例如生理指标集成有限,样本数量偏小。未来研究可进一步通过生理信号动态调权机制与自适应界面建模,提升模型的广泛适用性与准确性。此外,结合人工智能的自适应界面技术,系统能够根据操作员的实时状态调整信息显示方式,可进一步优化交互体验。

## 4 结　　论

本研究提出了一种基于 BWM 法和熵权法的主客观融合赋权模型,并结合模糊综合评价法,实现了多维指标的系统分析。通过森林消防指挥车显控台界面的实验验证,该模型的有效性得到了充分证实。实验数据显示,优化后的界面显著提升了任务效率和准确性,主任务完成时间缩短至(122.42 ± 17.23)s,任务正确率提升至(95.45 ± 8.23)%。眼动分析表明,注视次数减少至 56.24 ± 12.71,瞳孔扩张降低至(3.81 ± 0.28)px,而 NASA-TLX 评分显著下降至 42.61 ± 4.54,这些结果充分验证了认知负荷的有效降低以及任务效率的显著提升。因此,本研究为复杂系统人机界面设计提供了一种具有普适性的方法论框架。

该方法不仅适用于森林消防指挥车显控台,还可推广至其他高负荷作业场景,为跨学科研究和实践提供了有力支持。然而,尽管实验验证了优化设计的多项优势,仍需考虑研究中的局限性。当前实验样本规模较小,可能对研究结果的广泛适用性产生一定限制。同时,实际操作环境的动态性和复杂性可能对优化效果带来挑战。

未来研究将重点结合实际任务场景,进一步验证优化设计的动态适应性,并通过扩大实验规模以提高研究结果的普适性和可靠性。具体而言,将设计包含火灾噪音模拟、紧急指令中断和长时间连续操作的高压多任务实验,并招募消防一线操作人员参与,以验证模型在极端场景下的鲁棒性。此外,探索更多维度的指标评价模型,将有助于优化方法在更复杂系统中的应用推广。

总体而言,本研究不仅验证了优化设计在特定场景下的显著作用,还为其他复杂任务系统的人机界面优化设计提供了新思路和方法,为提升多任务系统的操作效率和安全性奠定了理论和实践基础。

## 参　考　文　献


[1] 邓丽, 余隋怀, 陈波. 基于 Vague 集的人机界面布局眼动追踪评价 [J]. 工程设计学报, 2016, 23(3): 222−227.
Deng L, Yu S H, Chen B. Eye tracking evaluation of human machine interface layout based on Vague set[J]. Journal of Engineering Design, 2016, 23(3): 222−227.

[2] Sweller J, Ayres P, Kalyuga S. Cognitive load theory[M]. New York: Academic Press, 2011: 37−76.

[3] Paas F, Sweller J. An evolutionary upgrade of cognitive load theory: using the human motor system and collaboration to support the learning of complex cognitive tasks[J]. Educational Psychology Review, 2012, 24: 27−45.

[4] Smerecnik C M R, Mesters I, Kessels L T E, et al. Understanding the positive effects of graphical risk information on comprehension: measuring attention directed to written, tabular, and graphical risk information[J]. Risk Analysis, 2010, 30(9): 1387−1398.

[5] Gegenfurtner A , Lehtinen E , Säljö R. Expertise differences in the comprehension of visualizations: a meta-analysis of eye-tracking research in professional domains[J]. Educational Psychology Review, 2011, 23(4): 523−552.

[6] 冯仲科, 姚山, 郝星耀, 等. F-star 林场地理信息系统平台设计思想、功能及应用前景 [J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(增刊 2): 1−4.
Feng Z K, Yao S, Hao X Y, et al. Design thoughts, functions and application foreground of F-star-GIS platform for forestry farms[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(Suppl.2): 1−4.

[7] 闫胜良, 马继东, 田静. 基于隐马尔可夫模型的火灾风险评估研究 [J]. 森林工程, 2024, 40(2): 151−158.
Yan S L, Ma J D, Tian J. Research on fire risk assess-ment based on Hidden Markov model[J]. Forest Engineering, 2024, 40(2): 151−158.

[8] 张新, 李文彬, 曹志勇. 基于无线传感器网络的森林火灾监测系统火焰探测模块设计 [J]. 森林工程, 2011(2): 52−55.
Zhang X, Li W B, Cao Z Y. Design of flame detection module of forest fire monitoring system based on wireless sensor network[J]. Forest Engineering, 2011(2): 52−55.

[9] 曹丽丽, 刘向宇, 陈响, 等. 吉林省延边地区森林火灾发生概率预测模型 [J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(3): 90−96.
Cao L L, Liu X Y, Chen X, et al. Prediction model of forest fire occurrence probability in Yanbian area, Jilin Province[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(3): 90−96.

[10] 张贤, 陈波. 船舶智能驾驶舱人机交互设计研究 [J]. 舰船科学技术, 2024, 46(22): 186−189.
Zhang X, Chen B. Research on human computer interaction design of ship intelligent cockpit[J]. Ship Science and Technology, 2019, 46(22): 186−189.

[11] 宋知潼, 刘玉雪, 刘洋, 等. 基于眼动实验的飞机座舱界面字符编码分析 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(33): 14144−14153.
Song Z T, Liu Y X, Liu Y, et al. Analysis of the aircraft cockpit interface character encoding based on the eye movement experiment[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(33): 14144−14153.

[12] 王伟伟, 顾炎辉, 余隋怀, 等. 智能座舱人机交互设计关键技术研究进展 [J]. 机械设计, 2024, 41(8): 30−36.
Wang W W, Gu Y H, Yu S H, et al. Research progress on key

technologies of intelligent cockpithuman-computer interaction design[J]. Journal of Machine Design, 2024, 41(8): 30−36.

[13] 陈磊, 吕健, 潘伟杰, 等. 融合认知负荷的用户界面布局优化 [J]. 计算机系统应用, 2022, 31(7): 307−315.
Chen L, Lü J, Pan W J, et al. User interface layout optimization incorporating cognitive load[J]. Computer Systems & Applications, 2022, 31(7): 307−315.

[14] 刘琳, 李哲林, 夏琴香. 数控机床操作面板的界面布局设计研究 [J]. 机械设计, 2024, 41(8): 127−133.
Liu L, Li Z L, Xia Q X. Research on interface layout design of CNC machine tool operation panel[J]. Journal of Machine Design, 2024, 41(8): 127−133.

[15] Deng L, Wang G, Yu S. Layout design of human-machine interaction interface of cabin based on cognitive ergonomics and GA-ACA[J]. Computational Intelligence and Neuroence, 2016, 2016(3): 1−12.

[16] 邓丽, 陈波, 余隋怀. 基于层次灰色关联分析的舱室内环境 HRA 评价 [J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(1): 260−265.
Deng L, Chen B, Yu S H. HRA evaluation of interior environmental of cabin based on analytic hierarchy process and grey correlation analysis[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(1): 260−265.

[17] Lu J, Ma J, Gong Z. Design of human-machine interaction interface for autonomous vehicles based on multidimensional perceptual context[J]. Scientific Programming, 2021(11): 1−8.

[18] 路易霖, 王煊智, 王喆诚, 等. 基于眼动生理测量的高原工程机械显示交互认知负荷研究 [J]. 人类工效学, 2024, 30(2): 46−52.
Lu Y L, Wang X Z, Wang Z C, et al. Research on cognitive load of display interaction of construction machinery on the plateau based on eye movement physiological measurement[J]. Ergonomics, 2019, 30(2): 46−52.

[19] 王玲玮, 王菊. 基于认知负荷和遗传算法的医疗 APP 界面布局设计 [J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(6): 56−59.
Wang L W, Wang J. Layout design of medical APP interface based on cognitive load and genetic algorithm[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2023, 36(6): 56−59.

[20] Sweller J, van Merriënboer J J G, Paas F. Cognitive architecture and instructional design: 20 years later[J]. Educational Psychology Review, 2019, 31: 261−292.

[21] van Merrienboer J J G, Sweller J. Cognitive load theory and complex learning: recent developments and future directions[J]. Educational Psychology Review, 2005, 17: 147−177.

[22] 赵希岗, 刘曼璐. 基于情感化的界面设计研究 [J]. 中国美术, 2023(2): 98−101.
Zhao X G, Liu M L. Research on interface design based on emotionalization[J]. Art in China, 2023(2): 98−101.

[23] 周垚, 陈登凯, 谭晓雪, 等. 时间压力下驾驶舱界面视觉搜索绩效研究 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2023, 44(10): 1514−1520.
Zhou Y, Chen D K, Tan X X, et al. Study on visual search performance of cockpit interfaces under time pressures[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2023, 44(10): 1514−1520.

[24] 赵春玲, 孟华, 孙立言. 民用飞机驾驶舱系统设计与综合集成的思考 [J]. 航空电子技术, 2023, 54(4): 1−8.
Zhao C L, Meng H, Sun L Y. Consideration on the design and integration of commercial aircraft cockpit systems[J]. Avionics Technology, 2023, 54(4): 1−8.

[25] Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method[J]. Omega, 2015, 53: 49−57.

[26] 李付星. 模糊综合评价在高校教师教学绩效考核中的应用研究 [J]. 包装工程, 2023, 44(增刊 1): 663−669.
Li F X. Research on the application of fuzzy comprehensive evaluation in the teaching performance evaluation of college teachers[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(Suppl.1): 663−669.

[27] 师勇, 徐格宁, 辛运胜, 等. 基于 JACK 仿真的电动单轨吊司机室人机工程分析 [J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(2): 139−144.
Shi Y, Xu G N, Xin Y S, et al. Ergonomic analysis and of electric monorail crane cab based on JACK simulation[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2023, 21(2): 139−144.

[28] 袁越, 苗安康, 吴涵, 等. 低碳综合能源系统研究框架与关键问题研究综述 [J]. 高电压技术, 2024, 50(9): 4019−4036.
Yuan Y, Miao A K, Wu H, et al. Review of the research framework and key issues for low-carbon integrated energy system[J]. High Voltage Technology, 2019, 50(9): 4019−4036.

[29] 赵珂. 船载显控台的仿真分析研究 [J]. 中国机械, 2024(7): 27−30.
Zhao K. Simulation and analysis research of ship-borne display and control console[J]. China Machinery, 2024(7): 27−30.

[30] 朱桐, 宋端树, 张善超, 等. 基于 Jack 的老年电动代步车人机工程设计与优化 [J]. 包装工程, 2024, 45(4): 107−114.
Zhu T, Song D S, Zhang S C, et al. Structural design and layout optimization of electric scooter based on Jack[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(4): 107−114.

[31] 陈进东, 张永伟, 周晓纪, 等. 专家熟悉度对技术预见的影响评估及参数优化 [J]. 科研管理, 2021, 42(6): 128−138.
Chen J D, Zhang Y W, Zhou X J, et al. An evaluation of the influence of expert familiarity on technology foresight and optimization of parameters[J]. Science Research Management, 2021, 42(6): 128−138.

[32] 徐丽丽, 栗继祖, 徐新华. 基于智能综采集控台人机系统的认知负荷研究 [J]. 中国煤炭, 2023, 49(8): 54−64.
Xu L L, Li J Z, Xu X H. Research on cognitive load of human-machine system based on central control console of intelligent fully mechanized mining[J]. China Coal, 2023, 49(8): 54−64.

[33] Wang X, Pang L, Miao D, et al. Evaluation of intelligent auxiliary information presentation mode for collaborative flight formation[J]. Aerospace, 2025, 12(1): 57.

[34] 许永生, 李丽丽, 吴尤荻, 等. 基于注意力分配的高铁操纵台界面布局优化设计 [J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(2): 401−409.
Xu Y S, Li L L, Wu Y D, et al. Optimization design of interface layout of high-speed railway control console based on attention distribution[J]. Joumal of Southwest Jiaotong University, 2022,

57(2): 401−409.

[35] 王嘉沅, 周汉杏, 文兆鍼, 等. 复杂人机系统界面设计: 前置线索对双任务人员绩效的影响研究 [J]. 工业工程与管理, 2024, 29(5): 14−23.
Wang J Y, Zhou H X, Wen Z C, et al. Interface design of complex human-machine systems: the influence of pre-cue on human performance in dual tasks[J]. Industrial Engineering and Management, 2024, 29(5): 14−23.

[36] 赵祎乾, 吴天宇, 李亚军, 等. 多指标决策的人机操控界面质量评估模型 [J]. 南京理工大学学报, 2021, 45(3): 375−384.
Zhao Y Q, Wu T Y, Li Y J, et al. Quality evaluation model of man-machine manipulation interface based on multi-index decision-making[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2021, 45(3): 375−384.

[37] 孙术发, 张山山, 李禹璇, 等. 国内外林区几种大型作业车辆研究进展及车型设计展望 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(6): 154−166.
Sun S F, Zhang S S, Li Y X, et al. Studies of several large-scale forestry operating vehicles at home and abroad and prospect of vehicle type design[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(6): 154−166.

[38] 张冬有, 冯仲科, 臧淑英. 基于 3S 技术的三维扑火队伍跟踪监控指挥系统研究 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(增刊 2): 103−106.
Zhang D Y, Feng Z K, Zang S Y. Three-dimensional monitoring and directing system responding to forest fire prevention teams based on 3S technology[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(Suppl.2): 103−106.

[39] 张欢. 基于 SuperMap 的森林火灾监测系统的实现 [J]. 森林工程, 2011, 27(5): 50−53.
Zhang H. Realization of forest fire monitoring system based on SuperMap[J]. Forest Engineering, 2011, 27(5): 50−53.

[40] 陈国富. 应用 GIS 模糊层次分析法对森林火灾风险区划——以湖南省宁远县为例 [J]. 东北林业大学学报, 2025, 53(2): 114−121.
Chen G F. Application of GIS fuzzy analytic hierarchy process for forest fire risk zoning study: a case study of Ningyuan County, Hunan Province[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2025, 53(2): 114−121.

[41] 王姊辉, 董恒, 赵洋甬, 等. 应用机器学习模型对中国云贵川区域林火风险预测 [J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(5): 113−119.
Wang Z H, Dong H, Zhao Y Y, et al. Prediction of forest fire risk in Yunnan, Guizhou and Sichuan using machine learning model[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(5): 113−119.

（责任编辑　吴　娟
责任编委　李文彬）