

康宁, 王殊轶, 王昱, 等. 基于智能优化算法和多决策模型的界面布局优化算法[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(9): 26-33. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.240904

基于智能优化算法和多决策模型的界面布局优化算法

康宁¹, 王殊轶¹, 王昱², 王雪¹, 王佳瑜¹

(1 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093; 2 飞利浦健康科技(中国)有限公司 飞利浦中国设计中心, 上海 200072)

摘要: 本研究从提高人机界面可用性、优化界面布局的角度出发, 提出了一种综合智能优化算法、熵权法-层次分析法(AHP)-逼近理想解排序法(TOPSIS)的界面布局优化方法。首先, 以计算机断层扫描仪界面的高保真原型, 为实验载体进行眼动追踪实验, 获取到界面元素之间的关联度; 建立界面布局优化的目标函数和多约束条件, 采用蚁群算法(ACO)对目标函数进行求解, 获得备选界面布局方案; 从界面的效率、有效性、满意度3个方面将鼠标点击次数、鼠标轨迹长度、错误数量、任务持续时间和SUS问卷分数作为评价指标。采用熵权法、AHP和TOPSIS形成的多准则决策(MCDM)模型评估并选出最优界面布局方案。实验结果表明, 最优界面布局方案TOPSIS综合得分为4.948037, 与原始界面相比, 完成任务所需的鼠标点击次数减少了11.90%、鼠标轨迹长度减少了35.60%、错误数量减少30.43%、任务持续时间减少了26.89%、SUS分数增加了2.75%。本研究使用的方法获得的最佳界面布局方案, 有效地提高了人机界面的可用性。

关键词: 人机界面布局; 眼动实验; 蚁群算法; 层次分析法; 逼近理想解排序法

中图分类号: TB472

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)09-0026-08

Interface layout optimization method based on intelligent optimization algorithm and MCDM

KANG Ning¹, WANG Shuyi¹, WANG Yu², WANG Xue¹, WANG Jiayu¹

(1 School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2 Philips China Design Center, Philips Health Technology (China) Co., Ltd, Shanghai 200072, China)

Abstract: In this study, from the perspective of improving the usability of human-computer interface and optimising the interface layout, an interface layout optimisation method integrating intelligent optimisation algorithm, entropy weight method - hierarchical analysis method (AHP) - approximation of ideal solution sorting method (TOPSIS) is proposed. Firstly, a high-fidelity prototype of the interface of the computed tomography scanner is used as an experimental carrier for eye-tracking experiments to obtain the correlation degree between the interface elements; the objective function and multiple constraints of the interface layout optimization are established, and the Ant Colony Algorithm (ACO) is used to solve the objective function and obtain the alternative interface layout scheme; from the three aspects of the interface, namely, the number of mouse clicks, the length of mouse track length, number of errors, task duration and SUS questionnaire score as evaluation indexes from three aspects of interface efficiency, effectiveness and satisfaction. The optimal interface layout was evaluated and selected by using the multi-criteria decision making (MCDM) model formed by entropy weight method, AHP and TOPSIS. The experimental results show that the optimal interface layout scheme has a TOPSIS composite score of 4.948037, which reduces the number of mouse clicks required to complete the task by 11.90%, reduces the length of the mouse track by 35.60%, reduces the number of errors by 30.43%, reduces the duration of the task by 26.89%, and increases the SUS scores by 2.75% compared to the original interface. The optimal interface layout solution obtained from the methodology used in this study effectively improved the usability of the human-computer interface.

Key words: human-machine interface layout; eye movement experiment; Ant colony algorithm; AHP; TOPSIS

基金项目: 2022年教育部产学研合作协同育人项目(220700487132405); 上海理工大学医工交叉项目(10-22-308-520)。

作者简介: 康宁(1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 医疗器械人因工程设计, 医疗器械可用性测试; 王昱(1987-), 女, 硕士, 设计师, 主要研究方向: 医疗器械人因工程设计; 王雪(1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 医疗器械, 增强现实, 人因工程; 王佳瑜(1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 医疗器械, 增强现实手术导航, 人因工程。

通讯作者: 王殊轶(1972-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 医疗器械人因工程设计, 医疗器械可用性测试。Email: wangshuyi@usst.edu.cn

收稿日期: 2023-05-30

0 引言

人机界面是系统与用户进行交互的媒介,在各个领域广泛存在^[1]。因此,人机界面的布局设计是非常重要的。界面布局设计是一个多因素约束、连续迭代反馈的过程。针对包含繁杂信息和元素的人机界面,建立一个最优的界面布局方案是一个典型的 NP-hard 问题^[2]。

国内外研究人员对界面布局优化的方法展开了一系列相关研究,其方法主要分为两种:一种方法是从界面中获取客观评价数据,运用算法对界面进行优化改进。如 Diego-Mas^[3]等在获取界面元素之间交互频率后,使用遗传算法对界面优化适应度函数求解,从而确立最优界面布局方案;李源枫等^[4]通过切片树方式生成待选界面布局方案,最终使用可用性测试对最优界面布局方案进行验证。这种方法从客观的角度,为改良界面布局提供了数据支撑,但是缺少了用户的主观认知角度。另一种方法从用户主观视角展开,从而优化界面布局。如段艳花等^[5]运用专家打分法确定了4个设计要素,手动设计了2个不同的用户界面,通过分析可用性实验数据选出最优界面;Guo F 等^[6]提出了一种以用户情感需求为中心的情感设计方法来优化界面设计,通过用户访谈捕捉用户的情感需求,构建了用户感知与界面之间的单用户关系模型,建立界面优化属性,从而实现界面优化设计。这种方法以用户为中心,能够捕捉用户对界面的多样化情感需求,但是因缺少客观数据的支撑导致研究结果过于主观化。

建立一个对人机界面的人因评价方法至关重

要。如:吕帅等^[7]以用户需求为中心,建立评价指标,用熵权法^[8]对指标赋权,最终使用灰色关联法确定最优方案。但熵权赋权法是一种客观赋权法,缺少主观因素。Benaida 等^[9]将尼尔森可用性原则、调查问卷以及启发式评估法相结合,使用 AHP^[10]对启发式评估结果进行成对比较进行排名。研究结果发现,虽然这种方法的评价效率更高,可以发现更多人机界面的可用性问题,但该方法完全以主观的视角来建立评价体系,往往评价结果过于主观化。

基于对上述界面布局优化的研究分析,本文提出一种综合蚁群算法、熵权法-AHP-TOPSIS 的界面优化方法。TOPSIS^[11]是一种可以解决方案排序问题的有效方法,但是 TOPSIS 方法对指标的权重分配是由主观决定,为了弥补这一不足,本研究结合主观与客观相结合的评价方式,运用组合评价理论思想,采用熵权法-AHP 组合赋权法对界面指标重新赋权^[12]。使用 TOPSIS 方法对使用蚁群算法建立出的7种待选界面布局排序,最终选出最优界面布局方案。

1 界面布局优化方法概述

本研究提出的界面布局优化方法分为3个阶段:第1阶段通过眼动实验获取界面元素的关联度和距离矩阵,使用蚁群算法生成不同的备选界面布局方案;第2阶段使用眼动追踪技术对备选界面布局方案进行可用性测试;第3阶段使用熵权法-AHP-TOPSIS 方法对备选界面布局方案进行排序并确认最佳界面布局方案。详细研究步骤如图1所示。

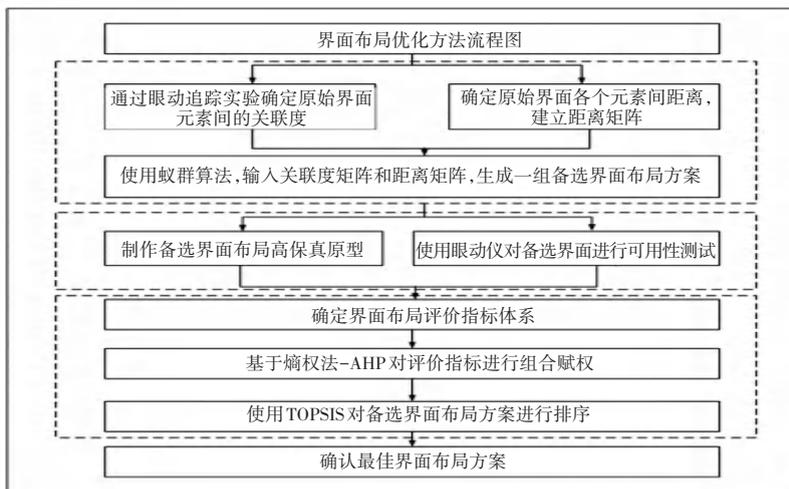


图1 界面布局研究步骤

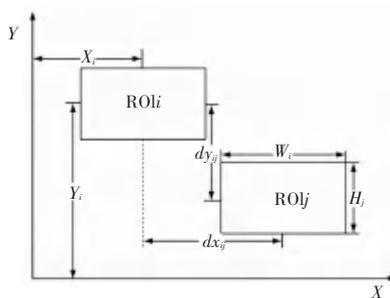
Fig. 1 Research steps of interface layout

1.1 界面优化目标函数建立

本研究以飞利浦公司 ipatient 型号 CT 机的软件界面为例,将扫描操作界面元素按照功能划分成 9 个不同的感兴趣区域 (ROI), ROI1 到 ROI9 分别为导航栏、扫描选项配置、扫描参数配置、开始扫描按钮、工具栏、检查卡、流程栏、心电图、图像显示区。ROI 区域均由矩形勾画,并建立了简化模型如图 2 所示。该模型以 CT 扫描操作界面左下角为原点建立平面二维直角坐标系,每个 ROI 的长和宽分别平行于 X 轴和 Y 轴。 W 和 H 分别为 ROI 的宽度和长度; X 、 Y 分别是 ROI 中心点距离坐标轴的距离; dx 、 dy 分别是两个 ROI 中心点的横向距离和纵向距离。考虑到某些元素需要特定的方向(如:心电图必须是横向),需要对 ROI 区域的长宽比 $R(R = l/w)$ 进行约束, l 为 ROI 区域的长, w 为 ROI 区域的宽。 R



(a) ROI 区域勾画示意图



(b) 简化模型图

图 2 待优化界面的 ROI 区域勾画示意图与简化模型图

Fig. 2 ROI region of the interface to be optimized is sketched and simplified

1.2 约束条件确立

对于一个布局合理的人机界面,不仅要符合设计原则,还要考虑界面中元素的位置、尺寸和形状等,因此对界面布局有以下条件约束^[13]。

(1) 状态均可见约束:为了避免两个关联度大的 ROI 之间距离过近产生重叠,导致界面元素状态不可见,本研究规定了以下约束。

$$\frac{l_i + l_j}{2} \leq |x_i - x_j| \quad (2)$$

$$\frac{w_i + w_j}{2} \leq |y_i - y_j| \quad (3)$$

其中, l_i 为 ROI_{*i*} 的长度, l_j 为 ROI_{*j*} 的长度; w_i 为 ROI_{*i*} 的宽度, w_j 为 ROI_{*j*} 的宽度; x_i 与 y_i 分别为 ROI_{*i*} 中心点的横坐标与纵坐标, x_j 与 y_j 分别为 ROI_{*j*} 中心点的横坐标与纵坐标。

(2) 元素均可视约束:为了避免某一 ROI 面积

小于 1 的 ROI 为横向方向。 R 大于 1 的 ROI 为纵向方向。通过眼动实验获取每个受试者的眼动数据和鼠标点击数据,计算每个 ROI 的平均注视时间和被鼠标点击的次数。根据扫视路径统计不同 ROI 之间的视觉交互频率,以及不同 ROI 之间的鼠标交互频率,建立 ROI 关联度矩阵。优化界面布局的目的是使界面交互成本达到最低,因此界面布局问题的目标函数为

$$\min C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} f_{ij} c_{ij} \quad (1)$$

式中: d_{ij} 表示 ROI_{*i*} 与 ROI_{*j*} 之间距离长度,即 $d_{ij} = \sqrt{dx_{ij}^2 + dy_{ij}^2}$, f_{ij} 表示 ROI_{*i*} 与 ROI_{*j*} 之间的交互频次,参数 c 表示当前方案符合所有多约束条件时, c 取值为 1,反之取值为 0。

过大,其余 ROI 面积过小的情况出现,导致界面元素不可视,本研究增加元素均可视约束。每个 ROI 的初始面积为 a_i ,则:

$$a_i \in [a_{i-\min}, a_{i-\max}] \quad (4)$$

(3) 特殊位置约束:某一些特殊功能的元素需要布置在界面中的某一固定位置 Q (如紧急按钮需要放置在固定位置),本研究增加了特殊位置约束^[14]:

$$P_{ROI_i} = Q \quad (5)$$

1.3 界面布局评价指标体系建立

在对人机界面布局进行人因评估之前,需要建立界面布局评价指标体系。本研究的目的是提高人机界面的可用性,而可用性涉及三方面:有效性、效率和满意度^[15]。每个维度都应有不同的指标,针对人机界面布局评价指标体系如图 3 所示。

评估层级	评估指标	指标说明	评估方法
有效性	指定次数	受试者完成测试任务的出错数量	记录观察
	任务完成度	受试者完成测试任务数与任务总数的比值	记录观察
效率	任务完成时间	受试者完成测试任务所用的时间	眼动追踪
	鼠标点击次数	受试者完成测试任务鼠标点击的次数	眼动追踪
	鼠标路径长度	受试者完成测试任务鼠标移动轨迹的长度	眼动追踪
满意度	满足感	该界面布局满足受试者的需求度	访谈, 受试者打分
	使用意愿	受试者是否愿意以后继续使用该界面	访谈, 受试者打分

图 3 界面布局评价指标体系说明

Fig. 3 Description of interface layout evaluation index system

1.4 熵权法-AHP-TOPSIS 多决策模型的构建

假设有 m 个备选界面方案, n 个评价指标, 则备选界面方案集合表示为 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, 评价指标集合表示为 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, 熵权法-AHP-TOPSIS 多决策模型的构建步骤如下:

步骤 1 根据评价指标对应的数据, 列出初始决策矩阵:

$$(D_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} \hat{e} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ \hat{e} d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \hat{e} \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{e} d_{m1} & d_{m2} & \dots & d_{mn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

步骤 2 为了统一评价指标的单位, 对初始决策矩阵进行标准化, 得到决策矩阵:

$$(P_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} \hat{e} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ \hat{e} P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \hat{e} \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{e} P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mn} \end{pmatrix} \quad (7)$$

步骤 3 使用熵权法计算评价指标客观权重。第 j 个指标的信息熵值 e_j 和客观权重 w_{e_j} 的计算方式为:

$$e_j = -\pi \sum_{i=1}^m z_{ij} \ln z_{ij}, n = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$w_{e_j} = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j} (j = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

步骤 4 使用 AHP 法计算评价指标的主观权重 w_{h_j} :

$$w_{h_j} = (w_{h1}, w_{h2}, \dots, w_{hn}), j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

步骤 5 确认每个评价指标的综合权重 w_{c_j} :

$$w_{c_j} = \frac{i w_{e_j} \times i w_{h_j}}{\sum_{j=1}^n i w_{e_j} \times i w_{h_j}}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

步骤 6 建立归一化决策矩阵:

$$V = (\omega_i P_{ij})_{mn} \quad (12)$$

$$(V_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} \hat{e} \omega_1 P_{11} & \omega_1 P_{12} & \dots & \omega_1 P_{1n} \\ \hat{e} \omega_2 P_{21} & \omega_2 P_{22} & \dots & \omega_2 P_{2n} \\ \hat{e} \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{e} \omega_n P_{m1} & \omega_n P_{m2} & \dots & \omega_n P_{mn} \end{pmatrix} \quad (13)$$

步骤 7 确定正理想解 A^+ 与负理想解 A^- :

$$A^+ = ((\max_i \mu_{ij} | j \in B)),$$

$$(\min_i \mu_{ij} | j \in C) = (\mu^+ | j = 1, 2, \dots, m) \quad (14)$$

$$A^- = ((\min_i \mu_{ij} | j \in B)),$$

$$(\max_i \mu_{ij} | j \in C) = (\mu^- | j = 1, 2, \dots, m) \quad (15)$$

其中, B 表示正向指标, C 表示负向指标。

步骤 8 计算待评估指标的正、负理想解距离 S_i^+ 和 S_i^- :

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{ij}^+)^2} \quad (16)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{ij}^-)^2} \quad (17)$$

步骤 9 计算指标 $i (i = 1, 2, \dots, n)$ 综合度得分 C 值:

$$e_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (18)$$

步骤 10 根据每个备选方案的综合度得分, 对备选界面布局方案排序。

2 眼动追踪实验

本研究分别对原始界面和由蚁群算法得出的 7 种备选界面进行 8 组眼动追踪对比实验。

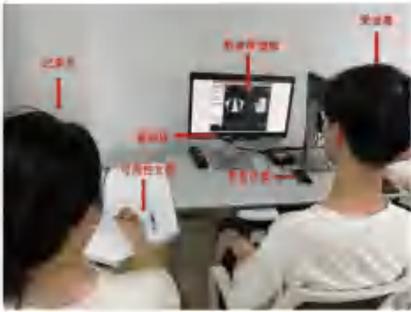
实验共招募 20 个受试者 (男性 9 人, 女性 11 人), 所有的受试者均有一定使用 CT 机经验, 视力或矫正视力全部正常, 均自愿参加眼动追踪, 眼动实验地点为上海理工大学人因工程实验室。

2.1 实验仪器与材料

眼动追踪实验以飞利浦公司 ipatient 型号 CT 机界面的高保真原型图 (如图 4) 为实验载体, 实验

环境(包括办公桌、办公椅和显示屏)足以模拟真实使用环境,测试结果能够反应界面真实使用中将会出现的问题。受试者的眼动数据由瑞典 Tobii 集团

研发的 Tobii X1 Light 眼动仪采集,实验是在安装有 Tobii Studio 眼动行为记录软件的计算机上进行,该软件可以对实时数据进行采集并分析^[16]。



(a) 眼动实验图



(b) CT 机界面高保真原型图

图 4 眼动实验图与实验材料

Fig. 4 Eye movement experiment diagram and experimental prototype diagram

2.2 实验过程

在实验开始之前,向每位受试者简要介绍实验的目的和实验流程,并要求受试者在 10 min 内熟悉实验流程。经过 30 min 的衰减期后,受试者开始按照事先制定好的实验任务(见表 1)正式进行眼动追踪,当任务执行完毕后按空格键结束实验。实验共分 7 组,分别对原始界面和 7 种备选界面进行眼动追踪实验,每组实验之间间隔 20 min,实验流程如图 5 所示。实验结束后,要求每个受试者对每一组眼

动实验进行访谈,对界面满足感和使用意愿进行打分。

表 1 受试者操作任务

Table 1 Subject operation tasks

编号	任务
1	完成一次平片扫描
2	定位扫描区域
3	完成扫描任务,退出扫描界面

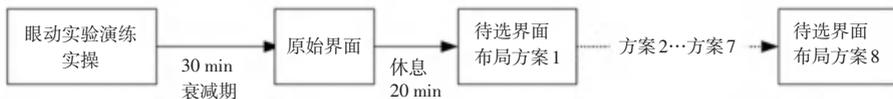


图 5 眼动实验流程

Fig. 5 Flow chart of eye movement experiment

3 结果分析

3.1 界面元素关联度结果分析

通过 Tobii Studio 软件分析收集到的每个参与者的眼动数据和鼠标点击数据,根据扫视路径计算

不同 ROI 之间的视线交互频率,以及不同 ROI 之间的鼠标交互频率,建立 ROI 关联度矩阵(见表 2)。图 6 为关联度矩阵可视化对称等高线图,颜色越红表示两个 ROI 之间的关联度越大,即这两个 ROI 之间关联度越高。

表 2 ROI 关联度矩阵

Table 2 ROI correlation degree matrix

ROI _i	ROI ₁	ROI ₂	ROI ₃	ROI ₄	ROI ₅	ROI ₆	ROI ₇	ROI ₈	ROI ₉
ROI ₁									
ROI ₂	0.54								
ROI ₃	0.44	38.53							
ROI ₄	1.24	2.31	34.21						
ROI ₅	1.35	1.78	1.13	3.21					
ROI ₆	0.74	2.76	19.43	2.14	2.21				
ROI ₇	40.85	32.61	7.21	1.14	6.82	1.29			
ROI ₈	0.32	47.12	39.24	3.24	3.01	30.43	4.31		
ROI ₉	4.60	37.84	24.12	5.63	36.8	33.81	5.52	4.31	

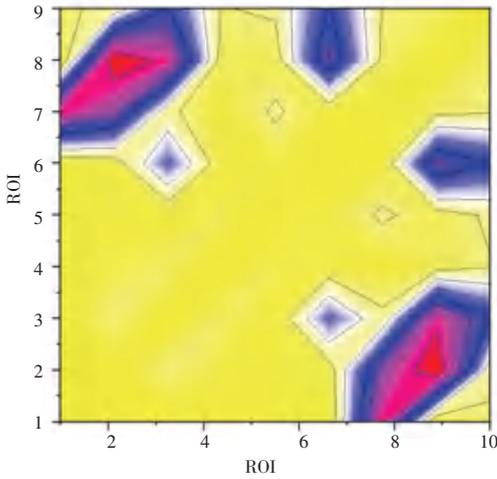


图 6 ROI 关联度矩阵可视化对称等高线图

Fig. 6 ROI correlation matrix visualization symmetric contour map

3.2 备选布局方案生成结果

当目标函数值为最小值时,程序输出最优解布局方案。本文所研究问题规模为 $n = 9$,即 ROI 数量

为 9 个,蚂蚁数量为 30,迭代最大次数为 100,信息素重要程度因子为 2,信息素挥发因子为 0.5。算法性能曲线如图 7 所示,为蚁群算法求得的 7 种待选界面布局方案和初始界面方案如图 8 所示。

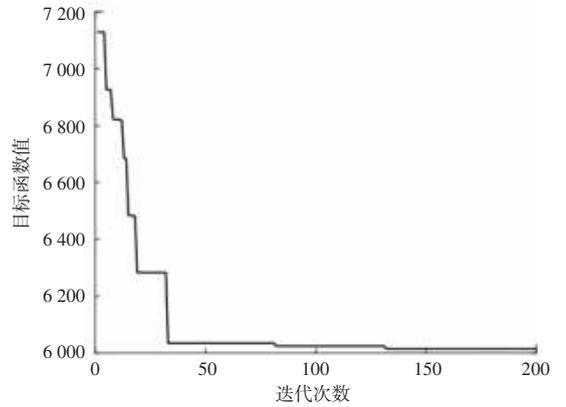


图 7 算法性能曲线图

Fig. 7 Algorithm performance curve



图 8 待选界面方案布局

Fig. 8 Layout scheme of the selected interface

3.3 熵权法-AHP-TOPSIS 评价结果分析

根据熵权法-AHP-TOPSIS 组合评价模型,对实验数据进行研究分析。首先,计算主观权重和客观权重,并计算出各指标的权重分布。根据表 3 可知,

任务完成时间和鼠标路径长度这两个指标数值较高。通过计算每个待选方案的正理想解距离、负理想解距离与综合得分指数对方案进行 TOPSIS 排名,得出最优界面布局方案为方案 7,见表 4。

表3 AHP、熵权法、综合计算所得权重

Table 3 AHP, entropy weight method, comprehensive calculated weight

指标	错误次数	任务完成度	任务完成时间	鼠标点击数	鼠标路径长度/px	满足感	使用意愿
主观权重	0.12	0.08	0.20	0.17	0.17	0.11	0.14
客观权重	0.07	0.07	0.24	0.12	0.28	0.13	0.07
综合权重	0.09	0.07	0.23	0.11	0.19	0.11	0.09

注:数值省略到小数点后2位

表4 使用 TOPSIS 对备选界面方案的排名

Table 4 Ranking of all alternative layout schemes by TOPSIS

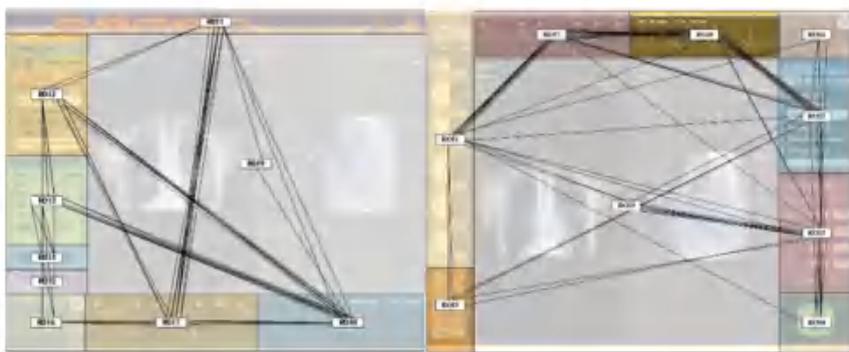
索引值	正理想解距离(D+)	负理想解距离(D-)	综合得分	排序
方案1	0.085 329	0.001 860	0.179 036	8
方案2	0.076 831	0.002 900	0.274 036	7
方案3	0.067 561	0.003 717	0.354 955	6
方案4	0.016 261	0.008 703	4.842 579	2
方案5	0.039 122	0.007 218	3.648 511	3
方案6	0.069 776	0.005 373	2.435 068	4
原始界面	0.081 189	0.005 091	1.385 428	5
方案7	0.053 081	0.009 684	4.948 037	1

注:数值省略到小数点后6位

3.4 最优界面与原始界面指标数据分析

原始界面与本文方法得出的最优界面的结果如图9所示。图9中,黑线表示ROI之间的关联度,ROI之间的黑线越粗,则ROI之间关联度越大。在最优界面布局方案中,关联度大的ROI之间的距离比原始界面的距离更近(如:ROI₁与ROI₇)。由表5可知,使用本文方法获得的最优界面在错误次数、任

务完成度、任务完成时间、鼠标点击数、鼠标路径长度、满足感和使用意愿7个指标上都优于原始布局。与原始界面相比,最优界面的错误次数减少了15.00%、任务完成度提高了3.30%、任务完成时间减少了2.65%、鼠标点击数减少了11.90%、鼠标路径长度缩短了23.78%、满足感增加了4.33%、使用意愿提高了7.28%。



(a) 原始界面

(b) 最优界面

图9 原始界面与最优界面ROI关联度可视化对比图

Fig. 9 A visual contrast of ROI correlation between the original interface and the optimal interface

表5 原始界面与最优界面的对比

Table 5 Comparison of the original layout scheme and the optimal layout scheme

方案	错误次数	任务完成度	任务完成时间/s	鼠标点击数	鼠标路径长度/px	满足感	使用意愿
原始界面	5.75	0.91	640.14	370.50	119 364.50	4.16	4.26
最优界面	5.00	0.94	623.16	326.40	90 985.32	4.78	4.57

4 结束语

本研究提出了一种集成蚁群算法、熵权法-AHP-TOPSIS的界面布局优化方法,主要目的是提高界面的可用性。可用性指特定用户在特定的使用背景下,使用某个产品达到特定目标的有效性、效率和满意度的大小^[17]。本研究将错误次数和任务完成度作为有效性的指标、将任务完成时间、鼠标点击数和鼠标路径长度作为效率的指标、将满足感和使用意愿作为满意度的指标。结果表明:最优界面的错误次数,任务完成时间、鼠标点击数和鼠标路径长度,以及界面布局方案的满足感和使用意愿均优于原始界面的设计方案。

本研究使用的基于熵权法-AHP-TOPSIS的评价方法将客观权重(熵权重)和主观权重(AHP权重)相结合,取代TOPSIS方法中直接设定的主观权重,该方法比单一评价方法更合理、更适用,在一定程度上起到了取长补短的作用,提高了评价的准确性和适用性,有助于对评价对象进行更合理的评价,并且减少了由主观判断引起的结论偏差^[18]。本研究的评估方法也可以用来解决选址、施工方案等问题。

本研究还存在局限性,对于界面不同语言版本对界面可用性的影响还需进一步研究。还将继续探索其他优化算法,以提高界面布局优化的效率和准确性。

参考文献

- [1] XU Z, WANG S. Interactive design of personalized website search interface based on visual communication [J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 2022(1): 2125506.
- [2] 韦曦,孙靖. 具有几何约束的非等面积界面布局优化方法[J]. *包装工程*, 2022, 43(24): 75-86.
- [3] DIEGO-MAS J A, GARZON-LEAL D, POVEDA-BAUTISTA R, et al. User-interfaces layout optimization using eye-tracking,

- mouse movements and genetic algorithms [J]. *Applied Ergonomics*, 2019, 78: 197-209.
- [4] 李源枫,吴群,张剑,等. 结合用户导向和遗传算法的医疗终端界面布局设计[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2021, 33(5): 662-670.
- [5] 段艳花,刘子建,宁铎. 基于眼动技术的TMA界面评估及优化[J]. *图学学报*, 2022, 43(4): 745-752.
- [6] GUO F, TIAN X, HU M, et al. Affective design of smart TV navigation interface considering the diversity of user needs [J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2023: 1-20.
- [7] 吕帅,李永锋. 基于熵权和灰关联的老年人信息终端界面布局评价研究[J]. *包装工程*, 2023, 44(2): 128-136.
- [8] 马宁,王亚辉. 智能汽车座舱人机交互任务复杂度分析方法[J]. *图学学报*, 2022, 43(2): 356-360.
- [9] BENAIDA M. Developing and extending usability heuristics evaluation for user interface design via AHP [J]. *Soft Computing*, 2023, 27(14): 9693-9707.
- [10] 孙林辉,韩贝贝,张伟. 基于眼动实验的英语学习类手机APP界面设计评价[J]. *人类工效学*, 2021, 27(2): 1-8.
- [11] 陈家托,郑宇星,张立巍. 基于AHP-GRA-TOPSIS的自闭症儿童家庭康复干预产品设计研究[J]. *包装工程*, 2023, 44(16): 132-144.
- [12] 叶坤武,罗堤钦,杨文佳,等. 多约束条件下飞机驾驶舱布局优化设计[J]. *人类工效学*, 2022, 28(5): 84-87.
- [13] 李智杰,石昊琦,李昌华,等. 基于改进遗传算法的影像中心布局优化方法[J]. *系统仿真学报*, 2022, 34(6): 1173-1184.
- [14] 谭浩,唐诗妍. 智能汽车交互界面用户体验评估方法体系综述[J]. *包装工程*, 2023, 44(6): 12-24.
- [15] TRAVERS P H, STANTON B A. Office workers and video display terminals; physical, psychological and ergonomic factors [J]. *Aaohn Journal*, 2002, 50(11): 489-493.
- [16] 孙雨萱,王殊轶. 基于眼动追踪的虚拟现实运动评估初步研究[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(18): 24-30.
- [17] EIMONTAITE I, VOINESCU A, ALFORD C, et al. Impact of different human-machine interface feedback modalities on older participants' user experience of CAVs in a simulator environment [C]//*Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Human Factors in Transportation*. 2020: 120-132.
- [18] PERRIER M J R, LOUW T L, CARSTEN O. User-centred design evaluation of symbols for adaptive cruise control (ACC) and lane-keeping assistance (LKA) [J]. *Cognition, Technology & Work*, 2021: 1-19.