

融合认知负荷的用户界面布局优化^①



陈磊, 吕健, 潘伟杰, 刘翔

(贵州大学 现代制造技术教育部重点实验室, 贵阳 550025)

通信作者: 吕健, E-mail: jlv@gzu.edu.cn

摘要: 为了优化项目管理系统界面, 提升界面的可用性, 提出一种融合认知负荷的界面布局优化设计方法. 该方法将客观认知规律与用户主观认知相结合, 形成布局设计原则, 并转化为可计算的界面布局多目标优化函数. 在此基础上, 利用麻雀搜索算法对目标函数编码, 寻求空间最优解, 得到布局优化方案. 为验证本文方法的有效性, 以某铁路项目管理平台首页为例, 使用该方法对其进行优化, 并将眼动生理测量方法引入评价过程中, 以测量眼动负荷大小为目标进行可用性测试. 实验结果表明优化后的界面布局相较于初始界面可用性指标有了明显提升, 证明了该方法的有效性且具有一定的实用性.

关键词: 界面布局; 认知负荷; 人机交互; 美度计算; 麻雀搜索算法

引用格式: 陈磊, 吕健, 潘伟杰, 刘翔. 融合认知负荷的用户界面布局优化. 计算机系统应用, 2022, 31(7): 307-315. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8623.html>

User Interface Layout Optimization Incorporating Cognitive Load

CHEN Lei, LYU Jian, PAN Wei-Jie, LIU Xiang

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology of the Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: A design method integrating cognitive loads is proposed to optimize the interfaces of project management systems and improve the usability of the interfaces. This method combines objective cognition laws with subjective cognition of users to form layout design principles and then transform them into a calculable multi-objective optimization function for interface layout. On this basis, the sparrow search algorithm (SSA) encodes the objective function to seek the optimal solution in space and obtain the layout optimization plan. The homepage of a railway project management platform is taken as an example to verify the effectiveness of the method in this study. Specifically, apart from the optimization of the proposed method, the physiological measurement method of eye movement is introduced into the evaluation process, and the usability test is carried out to measure eye movement loads. The experimental results show that the optimized interface layout has been significantly improved regarding the interface usability index, which proves the effectiveness and practicability of the method.

Key words: interface layout; cognitive load; man-machine interaction; beauty calculation; sparrow search algorithm (SSA)

随着人机交互技术的发展, 用户界面的呈现方式越来越多样化, 如何为用户打造高效、满意的用户界面是界面设计的热点. 界面质量是界面设计有效性和用户满意度的关键因素, 布局方式更是界面质量的重要组成部分. 影响布局方式的主要因素是界面元素本

身所要表达信息量的大小、用户的生理行为及心理认知等人因特性因素, 界面设计不仅需要满足用户生理特性的基本需求, 更是需要满足心理特性的认知层, 进而发展到人机系统设计中偏重用户体验的感性层^[1]. 目前基于管理平台界面设计中以用户体验为导向的设计

① 基金项目: 贵州省自然学科基金 (黔科合基础-ZK[2021] 一般 341); 云岩区科技局项目 (云科合字 [2020] 第 15 号); 贵州省科技厅自然科学基金 (黔科合基础 [2018]1049)

收稿时间: 2021-10-21; 修改时间: 2021-12-08; 采用时间: 2021-12-21; csa 在线出版时间: 2022-05-31

差距还较大,因此优化用户界面设计对于提升平台系统可用性及满意度具有重要意义。

1 相关工作

界面中布局方式所构成信息理解的难易程度决定了用户对于界面布局认知的准确性和高效性^[2],良好的布局方式有助于提升用户的认知效率。目前针对界面布局优化的方向主要有两种:一种是通过主观测量数据优化界面,另一种则是利用算法等技术手段进行界面布局设计。前者,许永生等人^[3]通过模拟实验测量驾驶员的注意力分配情况,通过主观量表工作负荷以及访谈对高铁操纵台布局进行优化;后者,Wu等人^[4]建立误差因子-视觉感知-界面布局的关联模型并利用遗传算法寻求最优解进行界面优化;康慧^[5]基于工效学及美度评价原则建立布局准则,并运用遗传算法对产品界面布局进行优化;刘昕等人^[6]引用改进粒子群算法提出了我国飞行员人机布局优化新方法;国外,Diego-Mas等人^[7]使用眼动跟踪、鼠标移动和切片树的遗传算法对界面进行布局优化;Oulasvirta等人^[8]对用户界面设计中元素组合优化的方法进行阐述。近年来在用户认知过程中有关认知负荷的研究越来越受到学者重视,袁义凡^[9]归纳了近10年认知负荷在界面设计中应用研究的热点领域、重点、研究趋势等,表明负荷大小是影响界面可用性设计和提升用户体验的重要因素之一。然而,目前将认知负荷引入界面布局优化的研究并不多。

界面布局优化本身属于多目标优化问题,遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等启发式算法已在许多布局优化问题研究中得到了应用。赵子健等人^[10]运用蚁群算法对操纵器布局进行优化排列,叶坤武等人^[11]引入带有惯性权重的粒子群算法对飞机驾驶舱界面布局进行优化。但算法之间各有优劣,遗传算法可以求全局最优解,但收敛速度较慢,局部搜索能力较差、控制变量较多;群智能优化算法因易操作、鲁棒性强等优点被广泛应用,典型的群智能优化算法有粒子群算法、蚁群算法,但是粒子群对于参数的设置依赖性较强,易陷入局部最优解中;蚁群算法计算量较大,收敛速度较慢且容易局部最优;Xue等人^[12]受麻雀觅食和反捕食行为的启发提出了麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA),该算法结构简单且控制参数较少,收敛速度快、稳定性好、全局搜索能力强,可以满足全局的搜索能力和局部探索能力,在进行优化问题时具有良好的性能,一定程度上提升了优化搜索空间的探索利

用能力。李雅丽等人^[13]使用标准基准测试函数对2010年以来新提出的6种典型群智能优化算法进行分析,结果表明SSA各方面性能优于其他算法。因此本文运用SSA对所建立的优化目标函数进行求解。

界面布局优化问题受到很多学者的研究,并出现许多相关的应用案例,但针对客观的工效学布局原则与用户心理认知规律相结合进行研究的较少。针对用户界面布局优化问题,本文建立了融合认知负荷以及界面美度计算为设计原则的多目标优化模型,利用SSA模拟种群的捕食和反捕食过程,生成界面优化布局解集。以某铁路建造智能化协同管理平台首页为例,展开优化方案的生成,并通过生理测量数据建立布局与认知负荷之间的评价目标函数,最后选取20名用户对初始方案及优化方案进行评价验证,本文流程如图1所示。

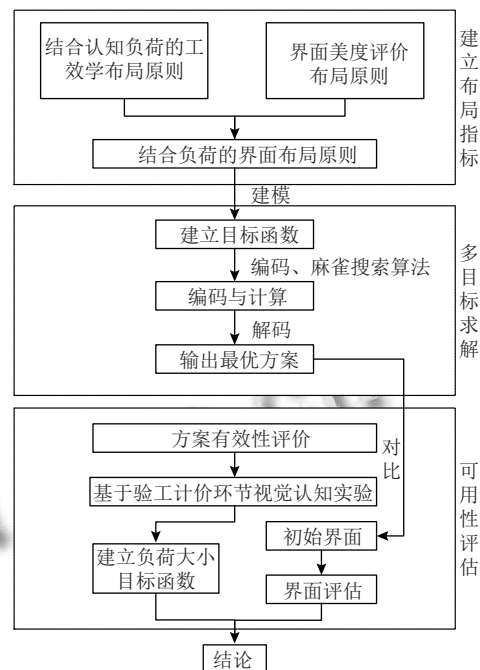


图1 结合负荷的界面布局优化流程图

2 建立界面布局设计原则

人机界面交互过程中,用户作为界面信息的接收者和使用者,始终是人机交互中的核心要素。界面布局是将元素按可行性约束放置于界面中,影响其设计的因素众多,需要综合考虑人机关系、人的认知模式、系统功能、界面设计美学、计算机技术、信息识别和获取等多方面的因素^[14]。在用户认知模型支持下,需要同时满足用户心理及生理的前提下并综合考虑用

户认知过程中会受到的影响因素^[15]. 界面设计在不断发展过程中, 形成了许多通用的界面布局设计原则: Sanders 等人^[16]建立了界面信息元素排列的基本设计原则; Wickens 等人^[17]提出了邻近相容原则, 要求相关元素应紧密的呈现在一起, 此外还需考虑到各元素的使用频率.

2.1 结合认知负荷的工效学布局原则

人机界面中的负荷主要存在于用户认知过程中, 随着界面信息数量的增多或信息难度的上升, 会加大用户在认知过程中的负荷量, 容易造成误操作等失误情形. 认知负荷理论划分了外在认知负荷、内在认知负荷和相关认知负荷 3 种类型的认知负荷. 李晶等人^[18]在均衡认知负荷中提出要减少外在认知负荷, 保持内在认知负荷, 增加相关认知负荷. 本文首先归纳了调节界面中外在认知负荷的策略, 与工效学原则进行结合并形成界面工效学基本布局原则.

外在认知负荷主要受信息元素的布局呈现方式影响, 因此界面布局设计中应着重关注如何降低外在认知负荷的策略. 界面设计中形成认知负荷的原因有: 信息量超过工作记忆; 信息难度超过认知加工水平; 注意力资源分配不均等. 因此界面设计中需要根据元素的重要程度来进行排列, 把重要元素放置在最佳视觉区域; 人的工作记忆有限, 因此需要减少无关信息干扰, 界面中可以利用邻近减负原则来减少不必要的设计. 调节外在认知负荷策略布局设计原则如表 1 所示.

界面布局优化最理想的结果是将每一个信息元素放置在最优位置, 充分发挥人机效率, 但布局原则之间会存在相互重叠, 为避免这种情况, 需要添加系数进行调控, 从而对设计原则进行优先排序. 布局优化要求优化方案整体评价最高, 布局原则约束下需要使目标函数得到最大值. 在优化模型中可以得出重要度越高、使用越频繁则需要靠近视觉最佳布置点, 加权值也就越大. 本文通过调节认知负荷策略原则, 确定界面元素操作顺序、重要程度、使用频率以及元素间相关性的设计原则, 由此建立目标函数如式 (1) 所示:

$$\begin{cases} H(i)_{\text{best}} = \max \left[\sum_{i=1}^n (\omega_{1i} S_i + \omega_{2i} \cdot P_i + O_i) \right] \\ \omega_{1i} = 1 - 1/n \\ \omega_{2i} = 1 - d_{ia}/d_{a\max} \end{cases} \quad (1)$$

其中, S_i 表示操作顺序; P_i 表示重要度和操作频率; O_i 是相关性原则; ω_{1i} 和 ω_{2i} 是位置控制系数; d_{ia} 是元素 i 的

几何中心的位置坐标与最佳布置点 a 的距离; $d_{a\max}$ 是待布局区域中的元素位置点与最佳布置点 a 的最大距离.

表 1 调节外在认知负荷策略及布局设计原则

认知负荷成因	认知负荷调节策略	界面设计准则
信息元素的认知过程中, 由于信息本身量的大小从而导致认知过程中的认知负荷	将信息元素放置在显著位置, 有助于提升用户注意力感知效率	重要元素重点突出
界面中的架构逻辑会引导用户的浏览顺序, 简单的架构也可能导致复杂操作从而加大认知负荷	将相关性较大的信息元素放在一起, 有效提升用户信息感知效率	邻近减负原则
界面中冗余信息会吸引用户注意力从而造成无效负荷	不仅需要避免信息的冗余, 而且需要避免界面美化的冗余效应	减少冗余信息以及界面美化效应

① 将界面元素按照一定的操作顺序放置, 有助于提升用户认知效率. 根据视觉认知规律, 元素应当按照从左到右或从上到下进行排列. 操作顺序矩阵 C 可以表示为:

$$C = C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1d} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \cdots & C_{nd} \end{bmatrix} \quad (2)$$

矩阵中, n 为界面元素个数, d 为不同任务下的操作顺序, C_{ij} 为元素 i 在任务 j 状态下的操作顺序. 操作顺序的数学模型可以表示为:

$$S_i = \sum_{j=1}^d \left[C_{ij} \left/ \sum_{i=1}^n C_{ij} \cdot \omega_{1i} \right. \right] \quad (3)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, d$, ω_{1i} 为信息元素 i 的操作顺序权重.

② 重要度由专家进行评价, 重要度矩阵可以表示为:

$$I = I_{ij} = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \cdots & I_{1h} \\ I_{21} & I_{22} & \cdots & I_{2h} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{n1} & I_{n2} & \cdots & I_{nh} \end{bmatrix} \quad (4)$$

矩阵中, h 为专家人数; I_{ij} 表示信息元素 i 由专家 j 进行评估的重要程度, 专家权重矩阵可以表示为 $\omega_C = [\omega_{C1} \ \omega_{C2} \ \cdots \ \omega_{Ch}]^T$.

信息元素的操作频率矩阵 F 可以表示为:

$$F = f_{ij} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1r} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & f_{nr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

矩阵中, f_{ij} 是指信息元素在使用过程中的操作频率, 操作的权重由其操作的概率决定, 表示为:

$$\omega_z = [\omega_{z1} \quad \omega_{z2} \quad \cdots \quad \omega_{zr}]^T$$

元素 i 的加权操作频率可表示为: $Z_i = \omega_z f_{ij}$; 因此, 重要度和操作频率原则的数学模型可以描述为:

$$P_i = I_i + Z_i \quad (6)$$

③ 相关性是反映信息元素之间关系的密切程度, 关系紧密的应靠近布置, 因此相关度矩阵可以表示为:

$$O = O_{ij} = \begin{bmatrix} O_{11} & O_{12} & \cdots & O_{1n} \\ O_{21} & O_{22} & \cdots & O_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ O_{n1} & O_{n2} & \cdots & O_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

矩阵中, O_{ij} 表示信息元素 i 和信息元素 j 的相关度, n 为待布局的信息元素数, 信息元素 i 与其他信息元素的相关性的数学模型可以表示为:

$$O_i = \sum_{j=i+1}^n (O_{ij}/d_{ij}) \quad (8)$$

$$F_{\max} = \varepsilon_1 \theta_1 \left(1 - \left(\left| \frac{w_L - w_R}{\max(|w_L - w_R|)} \right| + \left| \frac{w_T - w_B}{\max(|w_T - w_B|)} \right| \right) / 2 \right) + \varepsilon_2 \theta_2 (1 - (n_{\text{vertical}} + n_{\text{horizontal}}) / 4n) \\ + \varepsilon_3 \theta_3 \left(1 - 2 \left| 0.5 - \frac{\sum_i^n a_i}{a_{\text{frame}}} \right| \right) + \varepsilon_4 \theta_4 \left(1 - \left(\frac{P_L - P_R}{\max(|P_L|, |P_R|)} + \frac{P_U - P_D}{\max(|P_U|, |P_D|)} \right) / 2 \right) \quad (9)$$

其中, ε 为归一化因子, 为保证两部分量纲统一, 把数据映射在 $[0, 1]$ 之间处理并使它们的最优结果最大值接近 1; θ 为加权因子, $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 分别表示每一个因素的权重, 若影响因素简洁影响较大, 则 θ_1 相对于其他 $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 的值则较大, 且必须满足 $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = 1$ 。

3 基于麻雀搜索算法的界面布局优化

3.1 构建数学模型

首先建立界面元素布局坐标系, 通过简化处理降低目标函数求解的难度, 将信息元素转化为矩阵形状, 在二维坐标上进行设计布局. 将界面大小设为 $1920 \text{ px} \times 1080 \text{ px}$ (px 代表像素) 的矩形, 将需要放置的信息元素抽象为矩阵, 长和宽已知, 各信息元素在界面中和坐标轴平行. L 表示界面总长度, W 表示界面总宽度, 布局如图 2 所示。

针对布局优化问题, 上述建立了结合认知负荷的工效学以及美度计算的界面布局设计原则, 并将布局

d_{ij} 是指信息元素 i 与信息元素 j 之间的距离, 计算方式为 $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ 当相关性越大, d_{ij} 取值就越小。

2.2 美度计算设计原则

Ngo 等人^[19]在图形显示上制定了 14 种审美指标: 平衡、均衡、对称、顺序、凝聚力、统一性、比例、简单性、密度、规律性、经济性、均匀性、节奏性、顺序性和复杂性. 周蕾等人^[20]从界面的感性意象出发对美度计算进行定量分析, 建立界面美度的感性意象结构, 根据界面的平衡度、比例美度、简洁美和呼应美度 4 个方面进行 12 个美度指标的建立, 进一步完善了美度评价指标. 根据已有研究中的美度指标, 并针对于项目管理平台凝聚成 12 个美度感性词汇, 并邀请专家进行项目建设管理平台界面美度的语义进行评价, 根据最后的评价结果, 选取了简洁、统一、协调、舒适 4 个美度指标如表 2, 以此构建界面美度评价目标函数:

原则量化转为可进行计算的数学建模指标进行编码, 建立如下的优化目标函数:

$$H(i)_{\text{best}} = \max \left[\sum_{i=1}^n (\omega_{1i} S_i + \omega_{2i} \cdot P_i + O_i) \cdot \mu + \nu \cdot F_{\max} \right] \quad (10)$$

设界面中有 n 个待布局信息元素, l_i, w_i 分别代表物体 i 的长和宽, (x_i, y_i) 表示物体 i 在界面上的中心坐标. 待布局信息元素 i 的中心坐标和待布置元素 j 的中心坐标之间的距离通过式 (11) 进行计算:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (11)$$

最后求解得到满足设计原则的设计变量, 即信息元素坐标系集 $X = \{(x_i, y_i) | i = 1, 2, \dots, n\}$. 界面中的元素需要遵循界面大小的限制, 目标函数的构建需要确认信息元素不能超出布局范围且要确保元素信息之间不能重合, 因此需要加入间距及边界约束条件如下。

表2 界面布局美学评价度量指标^[20]

美学因子	指标名称	含义解释	计算公式
简洁	简洁度	计算界面信息元素对齐和组合化程度, 从而降低用户对界面设计形式意义上的理解难度.	$D_{s,i} = 1 - (n_v + n_h)/4n$ 其中, n_v 和 n_h 分别表示垂直和水平对齐点的数量, n 是界面中的全部物件数.
统一	密集度	是指整体元素在界面的松紧程度, 计算实际界面密度与一个最优化的界面密度间的差异性, 已有研究证明, 其维持在50%左右比较适宜, 既不会过于紧密也不会显得松散.	$D_{d,e} = 1 - 2 \left 0.5 - \frac{\sum a_i}{a_{\text{frame}}} \right $ 其中, a_i 和 a_{frame} 是物件 i 和整体界面的面积; n 是界面中的全部物件数, 对于用户界面来说, 近似的选定最优化的屏幕密集度水平是50%.
协调	层次感	界面信息存在着明显的层次感, 例如人眼对于左上角的信息加工明显优于右下角, 层次感与最佳界面从左上至右下分别为33%, 28%, 23%, 16%的差距.	$D_{b,a} = 1 - \left(\left 0.3 - \frac{n_{UL}}{\sum a_i/a_{\text{frame}}} \right + \left 0.28 - \frac{n_{UR}}{\sum a_i/a_{\text{frame}}} \right + \left 0.23 - \frac{n_{LL}}{\sum a_i/a_{\text{frame}}} \right + \left 0.16 - \frac{n_{LR}}{\sum a_i/a_{\text{frame}}} \right \right)$ 其中, a_i 表示物体的面积; n_{ij} 表示在1/4空间中的元素总数, a_{frame} 为界面的总面积.
比例	舒适度	节奏感的概念来源于古希腊形式美法则中所提到的节奏和韵律, 指的是在设计中的元素变化所产生的令人视觉愉悦的感受. 在界面设计中, 通过元素的排列、大小数量和形式加以计算.	$\max F_c = 1 - \left(\frac{P_L - P_R}{\max(P_L , P_R)} + \frac{P_U - P_D}{\max(P_U , P_D)} \right) / 2$ 其中, F_c 为界面布局的舒适度; L 和 R 分别表示界面的左、右区域, U 和 D 分别表示界面的上、下区域; $P_k = \sum_{i=1}^n S_{ik} d_i$, $k = L, R, U, D$, S_{ik} 为元素 i 在 k 区域的面积, d_i 为元素 i 的中心点与界面上下或左右对称轴间的距离.

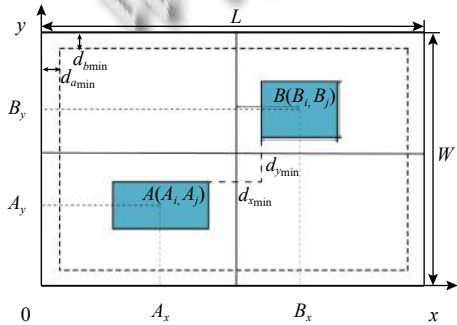


图2 界面布局示意图

(1) 间距约束: 信息元素应该保持一定的距离, 即要满足公式:

$$\begin{cases} |A_x - B_x| - \frac{A_i}{2} - \frac{A_j}{2} - d_{x\min} \geq 0 \\ |A_y - B_y| - \frac{B_i}{2} - \frac{B_j}{2} - d_{y\min} \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

$d_{x\min}$ 和 $d_{y\min}$ 分表示元素A和元素B在x和y方向的最小间距; A_i 和 A_j 分别表示元素A的长宽大小.

(2) 边界约束: 保证信息元素与界面边界保持一定的距离, 即要满足公式:

$$\begin{cases} d_{a\min} + \frac{A_i}{2} \leq x_A \leq L - \frac{A_i}{2} - d_{a\min} \\ d_{b\min} + \frac{B_i}{2} \leq y_A \leq W - \frac{B_i}{2} - d_{b\min} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $d_{a\min}$ 和 $d_{b\min}$ 分别表示元素与边界x方向和y方向的最小间距.

3.2 算法求解

本文运用 SSA 对目标函数全局寻找最优解, 适应度函数值最大时得到最优参数, 算法流程具体如图3所示.

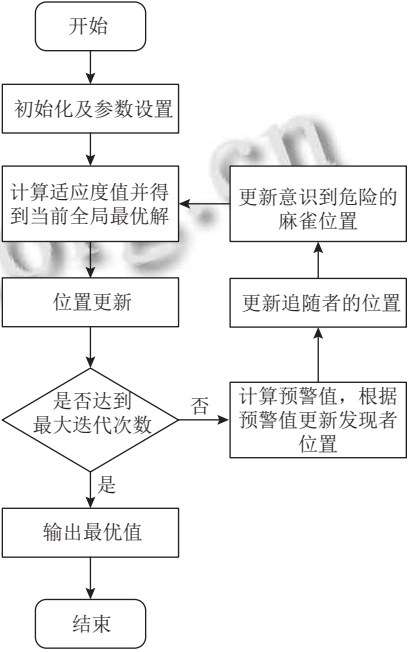


图3 麻雀搜索算法流程图

Step 1. 初始化变量和麻雀搜索算法各参数, 设置种群规模以及迭代次数.

Step 2. 计算初始适应度值, 得出初始适应度的极值及位置并且进行标记.

Step 3. 计算预警值. 在算法中,发现者为整个麻雀种群寻找食物并对所有追随者提供捕食方向,因此具有较好适应度值的发现者会优先获取食物,而且发现者可以获取更大的觅食搜索范围.

以预警值大小更新发现者的位置,在每次迭代中,发现者的位置更新如下:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \cdot \exp\left(\frac{-i}{\alpha \cdot \text{iter}_{\max}}\right), & \text{if } R_2 < ST \\ X_{i,j}^t + Q \cdot L, & \text{if } R_2 \geq ST \end{cases} \quad (14)$$

其中, t 为当前迭代次数, $j = 1, 2, \dots, d$. $X_{i,j}^t$ 表示第 i 只麻雀在迭代 t 次时的第 j 维值. $\text{iter}_{\max}$ 是迭代次数最多的常数. $\alpha \in (0, 1]$ 是一个随机数. R_2 ($R_2 \in [0, 1]$) 和 ST ($ST \in [0.5, 1]$) 分别表示报警值和安全阈值. Q 是一个服从正态分布的随机数. L 表示一个 $1 \times d$ 的全 1 矩阵, 其中每个元素都是 1. 当 $R_2 < ST$ 时, 这意味着周围没有捕食者, 发现者进入广泛搜索模式. 如果是 $R_2 \geq ST$ 时, 那就意味着一些麻雀发现了捕食者, 所有麻雀都需要迅速飞到其他安全的地方.

追随者是适应度比较差的个体, 它们监视发现者寻找食物, 为竞争食物会改变当前的位置. 更新追随者的位置, 根据式 (15) 更新追随者的位置.

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{X_{\text{worst}}^t - X_{i,j}^t}{i^2}\right), & \text{if } i > n/2 \\ X_p^{t+1} + \left|X_{i,j}^t - X_p^{t+1}\right| \cdot A^+ \cdot L, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

其中, X_p 是发现者所占据的最佳位置. X_{worst} 表示当前全局最差位置. A 表示 $1 \times d$ 矩阵且其中每个元素随机分

配 1 或 -1, $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$. 当 $i > n/2$ 时, 表明第 i 个适应度值较差的麻雀最有可能挨饿.

在模拟实验中, 我们假设意识到危险的麻雀占总数的 10%–20%. 这些麻雀最初的位置是在种群中随机产生的. 根据式 (16) 更新位置, 数学模型可以表示为:

$$X_{ij}^{t+1} = \begin{cases} X_{\text{best}}^t + \beta \cdot \left|X_{ij}^t - X_{\text{best}}^t\right|, & \text{if } f_i > f_g \\ X_{ij}^t + K \cdot \left(\frac{\left|X_{ij}^t - X_{\text{worst}}^t\right|}{(f_i - f_w) + \varepsilon}\right), & \text{if } f_i = f_g \end{cases} \quad (16)$$

为简单起见, 当 $f_i > f_g$ 表示麻雀在种群的边缘. X_{best} 代表人口中心的位置, 在它周围是安全的. $f_i = f_g$ 的研究表明, 处于种群中间的麻雀意识到了危险, 需要靠近其他麻雀. K 为麻雀移动的方向, 也是步长控制系数.

4 实例分析与验证

4.1 实例验证

本文以某铁路项目管理平台首页为研究对象, 对所提方法进行验证. 首先以平台界面首页为目标任务构建任务模型, 通过专家对信息元素的评价获取该目标任务所需要的任务信息元素以及之间关系. 首先对该平台首页所包含的决策信息元素: 系统名称、数字工厂、验工计价、物资管理、进度报表、合同管理、变更设计、质量工程、竣工资料、用户管理、系统设置以及平台菜单进行编码, 根据各个信息元素类型不同, 将每个类型以及同类元素进行标准化设定, 如表 3 所示.

表 3 12 个待布局元素的编码以及重要度、使用频率

布局元素	系统名称	数字工厂	验工计价	物资管理	进度报表	合同管理	变更设计	质量工厂	竣工资料	用户管理	平台菜单	系统设置
代码	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9	c10	c11	c12
频率	0	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3	0.4	0.2
重要度	0.2	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.4	0.4	0.4
尺寸	1920, 50	1200, 800	280, 120	280, 120	280, 120	280, 120	280, 120	280, 120	280, 120	80, 80	80, 80	80, 80

邀请平台专家针对各决策元素进行打分以此确定布局元素之间的重要度、使用频率以及元素之间的相关性, 布局与本身之间的相关性为 1, 所有确定的评分数据都确定在 $[0, 1]$ 之间, 待布局元素之间的影响因素越大则数值越大. 将评价结果进行综合计算, 重要度、使用频率见表 3, 待布局元素间的相关性见表 4.

通过上述步骤完成对布局元素的编码、界面以及待布局元素尺寸的定义以及相关数据的计算, 再设定

SSA 控制参数: 迭代的最大次数为 3 000, 种群大小设置为 300 ($n=300$), 发现者数量和 SD 分别占 20% 和 10%, $ST=0.8$, 通过问卷调研以及专家打分确定加权系数, 将数据输入 SSA 中, 运用 Matlab R2019b 进行辅助优化计算求解, 根据初始信息和约束条件, 得到适应度随迭代次数的变化曲线如图 4 所示.

从图 4 中可得, 在迭代至 20 次左右时获得最优解, 此时 12 个待布局元素在界面中的位置见表 5.

表4 12个待布局元素间的相关性

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9	c10	c11	c12
c1	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
c2	0.1	1	0.4	0.4	0	0	0	0.7	0.7	0	0	0
c3	0.1	0.4	1	0.8	0.8	0.8	0.5	0.5	0.5	0	0	0
c4	0.1	0.4	0.8	1	0.1	0.8	0.8	0.9	0.9	0	0	0
c5	0.1	0	0.8	0.1	1	0.9	0.4	0.8	0.8	0	0	0
c6	0.1	0	0.8	0.8	0.9	1	0.9	0.8	0.9	0	0	0
c7	0.1	0	0.5	0.8	0.4	0.9	1	0.5	0.5	0	0	0
c8	0.1	0.7	0.5	0.9	0.8	0.8	0.5	1	0.8	0	0	0
c9	0.1	0	0.8	0.9	0.8	0.9	0.5	0.8	1	0	0	0
c10	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.5	0.5
c11	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5
c12	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	1

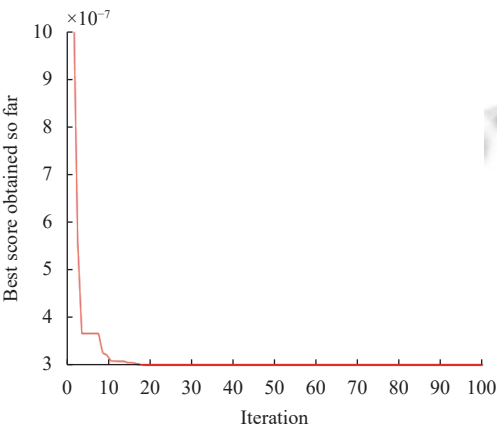


图4 适应度随迭代次数的变化曲线

表5 计算结果布局

待布局元素	x坐标	y坐标
c1	970.14	49.98
c2	1134.25	537.15
c3	155.39	170.13
c4	155.39	307.28
c5	155.39	444.43
c6	155.39	581.58
c7	155.39	722.73
c8	155.39	859.88
c9	155.39	997.03
c10	445.28	1002.13
c11	608.57	1002.13
c12	771.86	1002.13

结合表5的数据,将重要度及使用频率高的放置在视觉认知的最佳位置,按相关性与操作顺序确定了布局元素之间的位置和距离关系,从上到下进行纵向排列得到优化后的布局方案如图5所示。

4.2 方案有效性评价

为验证本文方法的有效性,运用眼动生理测量实验进行分析验证。Holsanova 等人^[21]指出不同布局对于

眼睛运动行为有显著影响,且已有眼动指标被证实与认知负荷具有显著相关性。本文首先归纳出5种常用布局方式以及6种眼动指标,运用方差分析计算 F 比求证不同布局与所选眼动指标之间是否具有相关性,并以眼动数据构建计算负荷量大小的评价函数,用以计算不同布局间负荷量的大小。



(a) 初始布局



(b) 优化后方案

图5 两种界面布局方案

从现有项目管理平台界面中归纳出5种常用的界面布局方式:上下型、左右型、厂字型、口字型、T字型,以验工计价界面为例形成实验样本,如图6所示。选取6种眼动指标:注视点数目、每秒注视点数量、平均注视持续时间、平均扫视长度、平均扫视速度以及扫视总长度。由易到难设计5种实验任务:流程审批、清单内计价、量差计价、变更设计、价差计价,测量用户在界面认知过程中眼睛运动行为数据。

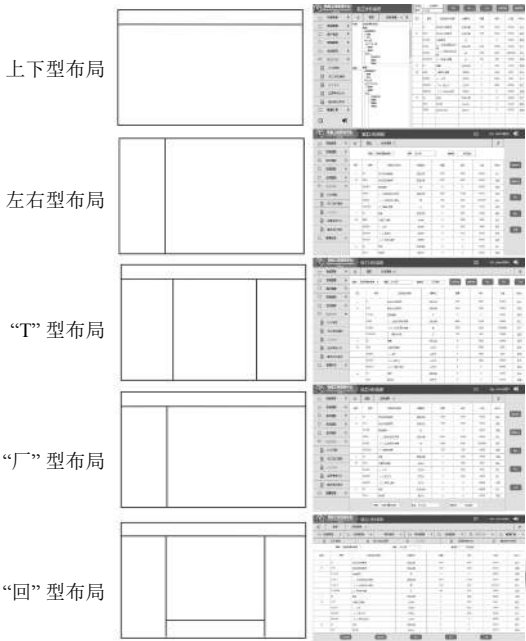


图6 布局结构示意图

为避免被试者因界面有序浏览顺序而影响实验结果,本文采用拉丁方设计实验.选取20名来自工业设计专业的硕士研究生,年龄(25±3.5)岁,视力正常或矫正视力正常.实验首先确定自变量是不同布局设计,因变量是眼动数据,根据拉丁方设计,随机将行与列调换成拉丁方表格,如图7所示.

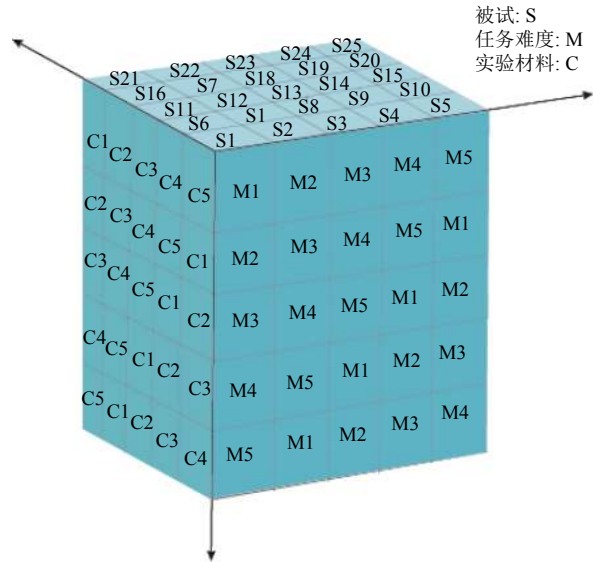


图7 实验处理顺序的分配方案

通过5种布局方式6种眼动指标进行双因素无交互作用方差分析计算F比,有关布局方式与眼动指标的F比值为:

$$\begin{cases} F_1 = \frac{MS_A}{MS_E} = S_A \cdot S_E \cdot (a-1)(b-1) \\ F_2 = \frac{MS_B}{MS_E} = S_B \cdot S_E \cdot (a-1)(b-1) \end{cases}$$

S_A 为因素A的平方和, S_E 为误差E的平方和, S_B 为因素B的平方和,因素A的自由度为(a-1),因素B的自由度为(b-1),误差E的自由度为(a-1)(b-1).由于无法避免用户之间的个性差异,因此显著性水平取值 $\alpha = 0.05$,实验数据结果如表6所示.查得 $F_{0.05}(4,20) = 2.81$, $F_{0.05}(5,20) = 2.71$,计算得出 $F_1 = 3.14 > 2.81$, $F_2 = 6.27 > 2.71$,结果表明不同布局方式与所选眼动指标具有显著的影响,所得眼动数据具有有效性,基于此数据可以建立测量眼动负荷大小的评价函数.

表6 双因素方差显著性计算分析				
方差来源	平方和	自由度	均方	F比
布局A	53473988	4	2167641.2	3.14
指标B	133424581	5	26684916.2	6.27
误差E	85149663	20	4257483.15	—
总和T	272048232	29	—	—

实验获取到20名被试人员的眼动指标数据,由此建立测量眼动负荷的目标函数:

$$f(x) = a \cdot L_{dn} \quad (17)$$

L_{dn} 是指被试者界面认知过程中d布局的第n种眼动指标,矩阵可以表示为:

$$L_{dn} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{d1} & L_{d2} & \cdots & L_{dn} \end{bmatrix} \quad (18)$$

a是指被试者的d布局的第n种眼动指标的均值大小,矩阵可以表示为:

$$a = \begin{bmatrix} \bar{L}_{11} & \bar{L}_{11} & \cdots & \bar{L}_{11} \\ \bar{L}_{11} & \bar{L}_{11} & \cdots & \bar{L}_{11} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{L}_{11} & \bar{L}_{11} & \cdots & \bar{L}_{11} \end{bmatrix} \quad (19)$$

根据数据结果求得a值,运用Matlab R2019b计算相乘求得界面认知过程中负荷量的大小.让20名被试者对项目管理首页初始界面及优化后的布局界面进行验证分析,计算结果如表7所示.

计算结果显示优化后的布局数值低于初始布局数值,表明本文基于SSA的界面布局优化模型后的界面相对于初始界面,降低用户认知负荷量,提升用户认知效率,增强了界面的可用性.

表7 测量负荷大小结果

初始布局	优化后的布局
2.915 0	2.134 5
3.482 5	2.537 1
4.147 4	3.003 5
3.509 7	2.552 5
3.413 3	2.476 6
2.953 8	2.148 9

5 结语

本文以降低用户认知过程中的负荷大小及减少界面设计的主观性为目标,建立融合眼动负荷的界面布局设计原则并运用 SSA 进行优化设计.该方法综合考虑界面对用户影响因素,从客观的界面布局基本原则及用户主观认知出发,建立结合认知负荷的工效学和美学计算的目标优化函数,通过对信息元素的合理布局,提升用户的认知效率,降低用户认知过程中负荷大小,增加用户对界面的满意度,提升了系统平台的可用性.此次研究还未考虑到布局元素的颜色、动效等视觉因素对用户认知过程负荷大小的影响,后续的研究中会进一步探索并完善该研究.

参考文献

- 邓丽, 王国华, 余隋怀. 遗传-蚁群算法求解司钻控制室操纵器布局优化. 工程设计学报, 2016, 23(2): 143–151. [doi: 10.3785/j.issn.1006-754X.2016.02.007]
- 李晶, 郁舒兰, 刘玮. 基于眼动追踪的数控界面布局认知特性评价. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(7): 1334–1342. [doi: 10.3969/j.issn.1003-9775.2017.07.020]
- 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. 西南交通大学学报, 2022, 57(2): 401–409.
- Wu XL, Chen Y. Correlation between error factors, visual perception, and interface layout—Taking digital instrument control equipment of nuclear power safety injection system as an optimization example. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2020, 34(5): 2055012. [doi: 10.1142/S0218001420550125]
- 康慧, 杨随先, 邓淑文, 等. 产品操作界面元素布局多目标优化设计. 包装工程, 2020, 41(8): 149–153, 172.
- 刘昕, 余隋怀, 初建杰, 等. 改进 PSO 的飞机驾驶舱组合排序人机布局优化. 计算机工程与应用, 2015, 51(7): 1–6. [doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.1409-0243]
- Diego-Mas JA, Garzon-Leal D, Poveda-Bautista R, et al. User-interfaces layout optimization using eye-tracking, mouse movements and genetic algorithms. Applied Ergonomics, 2019, 78: 197–209. [doi: 10.1016/j.apergo.2019.03.004]
- Oulasvirta A, Dayama NR, Shiripour M, et al. Combinatorial optimization of graphical user interface designs. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(3): 434–464. [doi: 10.1109/JPROC.2020.2969687]
- 袁义凡. 近十年认知负荷在界面设计中的应用研究综述. 设计, 2020, 33(17): 116–118. [doi: 10.3969/j.issn.1003-0069.2020.17.036]
- 赵子健, 吕健, 金昱潼, 等. 人因特性驱动蚁群算法的操作界面布局优化. 组合机床与自动化加工技术, 2020, (5): 124–127, 131.
- 叶坤武, 包涵, 魏思东. 基于视觉注意力分配的飞机驾驶舱人机界面布局优化. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(3): 416–421.
- Xue JK, Shen B. A novel swarm intelligence optimization approach: Sparrow search algorithm. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22–34.
- 李雅丽, 王淑琴, 陈倩茹, 等. 若干新型群智能优化算法的对比研究. 计算机工程与应用, 2020, 56(22): 1–12. [doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.2006-0291]
- 沈擎阳, 薛澄岐, 牛亚峰. 基于 ERP 的人机交互界面设计方法研究. 设计, 2018, (6): 134–135. [doi: 10.3969/j.issn.1003-0069.2018.06.045]
- 李雪楠, 赵江洪, 赵丹华. 基于用户认知偏好的 3D 打印软件界面交互设计. 机械设计, 2018, 35(7): 124–128.
- Sanders MS, McCormick EJ. 工程和设计中的的人因学, 第 7 版. 清华大学出版社, 2009.
- Wickens CD, Carswell CM. The proximity compatibility principle: Its psychological foundation and relevance to display design. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 1995, 37(3): 473–494.
- 李晶, 薛澄岐, 王海燕, 等. 均衡时间压力的人机界面信息编码. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(7): 1022–1028. [doi: 10.3969/j.issn.1003-9775.2013.07.012]
- Ngo DCL, Teo LS, Byrne JG. Modelling interface aesthetics. Information Sciences, 2003, 152: 25–46. [doi: 10.1016/S0020-0255(02)00404-8]
- 周蕾, 薛澄岐, 汤文成, 等. 界面元素布局设计的美学评价方法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(5): 758–766. [doi: 10.3969/j.issn.1003-9775.2013.05.022]
- Holsanova J, Holmberg N, Holmqvist K. Reading information graphics: The role of spatial contiguity and dual attentional guidance. Applied Cognitive Psychology, 2009, 23(9): 1215–1226. [doi: 10.1002/acp.1525]

(校对责编: 孙君艳)