基于 RULA 与 QPSO 的矿用挖掘机操作界面布局优化研究

冯青[1]，郝秀丽[1*]，杨延璞[2]，刘国闯[3]
（1.西安科技大学 艺术学院，西安 710054；2.长安大学 工程机械学院，西安 710064；
3.天津理工大学 艺术学院，天津 300384）

摘要：目的 现有复杂操作界面的布局对于人体舒适性缺乏量化，本文提出了一种将人体舒适因素定量化的操作界面布局优化设计方法。**方法** 首先，通过快速上肢评价法（RULA）与视觉注意度评价量化操作界面的舒适性需求，结合待布元件的重要度与使用频率权重建立人体舒适因素的布局优化数学模型；然后，利用量子粒子群算法（QPSO）求解该数学模型，并依据求解结果对操作界面进行布局设计；最后，采用模糊综合评价法对优化前后的操作界面设计方案进行比较。**结果** 以某型矿用挖掘机操作界面的布局设计为实例进行验证，发现优化后操作界面的舒适性得到了明显改善。**结论** 该研究可为复杂操作界面提供一种以人体舒适因素为主要目标的布局优化方法。

关键词： 工业设计；人机界面；快速上肢评价法；量子粒子群算法；改进群 AHP-GRA 法
中图分类号： TB47 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2023)18-0155-11
DOI： 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.18.018

Optimization of Mining Excavator Operation Interface Layout Based on RULA and QPSO

FENG Qing[1], *HAO Xiu-li*[1*], *YANG Yan-pu*[2], *LIU Guo-chuang*[3]
(1.School of Art, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China; 2.School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3.School of Art, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

ABSTRACT: The layout of the existing complex operation interface lacks quantification of human comfort. Based on this, the work aims to propose a method for optimizing the layout of operation interfaces that quantifies human comfort factors. The comfort requirements of the operation interface were quantified through rapid upper limb assessment and visual attention evaluation, and a mathematical model for optimizing the layout of human comfort factors was established based on the importance of the components to be laid and the weight of usage frequency. Then, the quantum particle swarm optimization algorithm was adopted to solve the mathematical model, and the operation interface was laid out based on the solution results. Finally, the fuzzy comprehensive evaluation method was used to compare the operation interface design schemes before and after optimization. The layout design of a certain type of mining excavator operation interface was validated as an example, and the comfort of the optimized operation interface was significantly improved. This study can provide a layout optimization method for complex operation interfaces with the main objective of human comfort factors.

KEY WORDS: industrial design; HMI; rapid upper limb assessment; quantum particle swarm optimization; improved group AHP-GRA method

矿用挖掘机作为矿山采掘的重要大型机械设备，驾驶员需在恶劣的露天矿环境中进行长时间作业[1]。受复杂环境与工况影响，矿用挖掘机操作元件数量庞大且种类繁多[2]，这就增加了作业人员的认知与操作负荷，易导致安全事故的发生。因此，操作界面作为保证驾驶人员作业安全与效率的主要载体[3]，其布局的合理性至关重要。

国内外学者对人机界面布局优化进行了深入研

收稿日期： 2023-04-18
基金项目： 国家自然科学基金项目（51805043）；长安大学中央高校基本科研业务费资助项目（300102253107）

究，主要集中在智能布局的方法上。智能布局将人机界面布局问题由实际的工程难题简化为一个数学模型[4]，再使用智能算法进行求解，从而实现待布元件的自动化布置。HAO 等[5]利用视锥细胞的视觉特征来划分视觉感知强度等级，以视觉传达指标为优化目的建立了人机交互界面优化的数学模型；王大颜等[6]将直感交互理念融入显控台界面的设计过程中，提出一种基于重要度子函数、隐喻度子函数，以及使用频率子函数的界面布局优化模型；陈磊等[7]结合认知负荷的工效学布局原则与界面美度评价布局原则，建立了界面布局多目标优化函数，并利用麻雀搜索算法进行了求解；王旭等[8]依据双手垂直可达域的舒适性等级，构建起基于可达域的激光增材制造装备人机界面布局优化模型，并提出一种混合狼群-粒子群算法的智能求解算法。

现有大型工程机械操作界面的布局模型仍以工效学中元件几何位置匹配的原则为主，对操作人员的姿势舒适性与视觉注意度虽各有一定的数学描述，但缺少规范化的表述与综合考量。

为解决上述问题，本文提出了一种人体舒适性约束量化表达的方法，通过采用快速上肢评价法（RULA）与视觉注意度评价，对待布元件与待布区域赋予不同的舒适度权重，并结合布局原则构建起基于人体舒适因素的人机界面布局优化目标函数，并利用量子粒子群算法对其进行求解，从而实现以人体舒适因素为主要目标（QPSP）的人机界面的智能化布局。

1 操作界面布局优化流程

基于人体舒适因素的操作界面布局优化流程，见图 1。

1）采用改进群 AHP-GRA 法求解待布元件重要度和使用频率的相对权值和综合权值。

2）依据上肢作业姿势的不同对操作面板进行分区，利用快速上肢评价法对已划分的面板模块与待布元件进行操作舒适度赋值，将操作元件的综合权值、元件所在面板模块的操作舒适度，以及元件的操作舒适度相乘，建立起人体操作舒适性的子目标函数。

3）对已划分模块的视觉注意度进行赋值，以操作元件的综合权值与元件所在模块的视觉注意度相乘，建立起人体视觉舒适性的子目标函数。

4）建立操作界面的布局优化总目标函数。

5）输入待布空间和待布物体的基本参数，进入量子粒子群算法流程求解最优解，得到最优解后将其转化为布局方案并输出。

6）得到初步布局方案后，利用模糊综合评价法对优化前后的操作界面布局进行对比，经人工调整后输出最终布局方案。

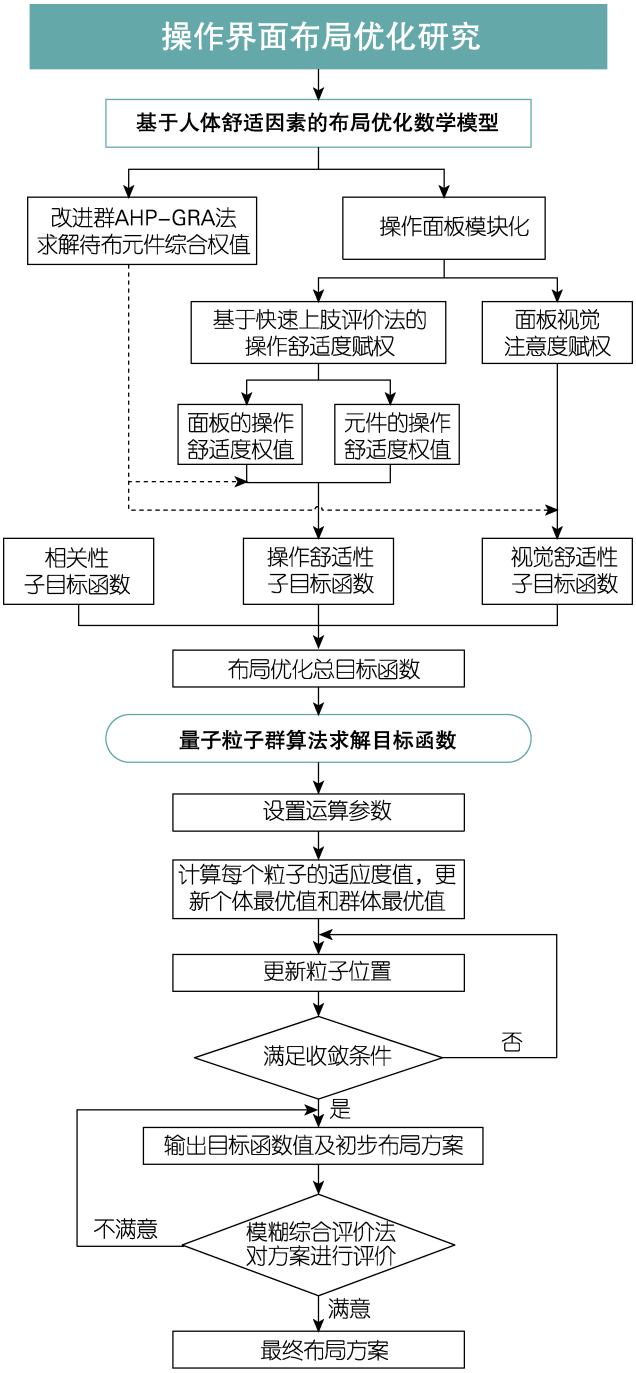

图 1 操作界面布局优化设计的流程

Fig.1 Process of optimization design of operation interface layout

2 基于人体舒适因素的操作界面布局优化模型

为包含多个显控元件的操作界面建立最佳配置是一个复杂的问题[9]，其布局设计是一个考虑多工效学准则的决策系统[10]。布局设计原则是建立布局优化数学模型的基础，参考相关驾驶室人机界面设计的规定，将重要性原则、使用频率原则、相关性原则与操作及视觉舒适度评价准则相结合，建立起操作界面的布局优化数学模型。

2.1　布局问题描述

矿用挖掘机驾驶室操作界面分为左手柄界面、右手柄界面，以及左侧操控台界面三个部分[11]，见图 2。座椅两侧手柄界面是挖掘机的主要操作界面，此类界面的操作元件较少且布局相对固定，驾驶人员的培训及操作流程已在业内形成规范，故不做布局优化考虑。因此，选取左侧操控台界面作为布局优化的对象。

a　WK55 型矿用挖掘机左侧操控台　　b　座椅两侧控制装置

图 2　矿用挖掘机驾驶室操作界面

Fig.2 Operation interface of mine excavator cab

2.1.1　待布空间和待布物体

为简化求解过程，将矿用挖掘机操作界面的布局设计转变为二维布局问题。将待布空间转化为二维矩形平面，其 x 轴的边长为 L，y 轴的边长为 W。并以待布空间的某一顶点为中心建立直角坐标系，空间中心点坐标为 $(L/2, W/2)$。设有 n 个待布元件，各元件在使用过程中需预留一定的操作空间及文字说明空间，统称为姿态空间。因此，结合待布元件的姿态空间将其转化为 x 轴边长为 a_i，y 轴边长为 b_i 的几何图形，待布元件 i 在面板上的中心点坐标 (x_i, y_i) 为布局求解过程中的变量。待布空间和待布元件的几何化处理，见图 3。

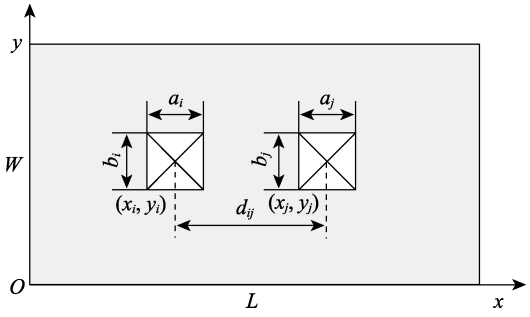

图 3　布局示意简图

Fig.3 Layout diagram

2.1.2　约束条件

操作界面中待布元件的布局须满足的约束条件如下[12]。

1）间距约束。待布元件间应保持一定的距离，彼此互不干涉，具体见式（1）—（2）。

$$|x_i - x_j| - \frac{a_i}{2} - \frac{a_j}{2} \geqslant 0 \tag{1}$$

$$|y_i - y_j| - \frac{b_i}{2} - \frac{b_j}{2} \geqslant 0 \tag{2}$$

2）边界约束。待布元件不能超出待布空间范围，具体见式（3）—（4）。

$$\frac{a_i}{2} \leqslant x_i \leqslant L - \frac{a_i}{2} \tag{3}$$

$$\frac{b_i}{2} \leqslant y_i \leqslant W - \frac{b_i}{2} \tag{4}$$

2.2　基于改进群 AHP-GRA 法的待布元件权重分析

重要性原则[13]是指将显控元件按使用的重要性布局在操作人员的最佳视野范围及人手的最佳操作范围内，以提升整个人机系统操作的协调性。使用频率原则[13]是指将使用频率较高的元件布置在操作者方便触达的区域内，从而减少操作负荷，提高作业效率。元件的重要性与使用频率是人体舒适性量化的重要影响因素，采用改进群 AHP-GRA 法对元件的权值进行求解，可更好地实现多专家判断信息的集结，为布局优化目标函数的建立提供准确支持。

2.2.1　待布元件的重要性权值求解

将矿用挖掘机操作界面的待布元件按功能进行分类，构建起操作界面组成元件的层级模型，见图 4。

m 个专家对 n 个待布元件进行评估，采用 1~9 标度法构建起各专家判断矩阵，计算出第 k 位专家评价的第 i 个元件的重要性权值，以此构建原始评价矩阵 $\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}$，见式（5）。

$$\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}} = (w_{ki}^{\mathrm{a}})_{m\times n} \tag{5}$$

将 $\boldsymbol{W}_{\mathrm{a}}$ 进行均值化处理得规范化矩阵 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{a}}$，为减少个体差异对评估结果的影响，对各位专家的重要性判断借鉴相对贴近度思想[14],使用灰色关联法分析出各专家的关联系数并进一步得到专家权重[15]。选取专家们对各待布元件评价信息的均值作为参考序列，见式（6）。

$$U_0^{\mathrm{a}} = (u_{01}, u_{02}, \cdots, u_{0n}) \tag{6}$$

得出各专家的元件重要性权值与参考值之间的灰色关联系数 β_{ki}，见式（7）。

$$\beta_{ki} = \frac{\min|u_{0i} - u_{ki}| + \rho\max|u_{0i} - u_{ki}|}{|u_{0i} - u_{ki}| + \rho\max|u_{0i} - u_{ki}|} \tag{7}$$

式中：ρ 为分辨系数，一般取 0.5。

带入关联度计算公式，见式（8）。

$$r_{0k} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\beta_{ki} \tag{8}$$

经归一化计算后，得出各专家的权重向量 $\boldsymbol{E}$，见（9）。

$$\boldsymbol{E} = (e_1, e_2, \cdots e_m) \tag{9}$$

式中：$e_k = \dfrac{r_{0k}}{\sum_{k=1}^{m} r_{0k}}$.

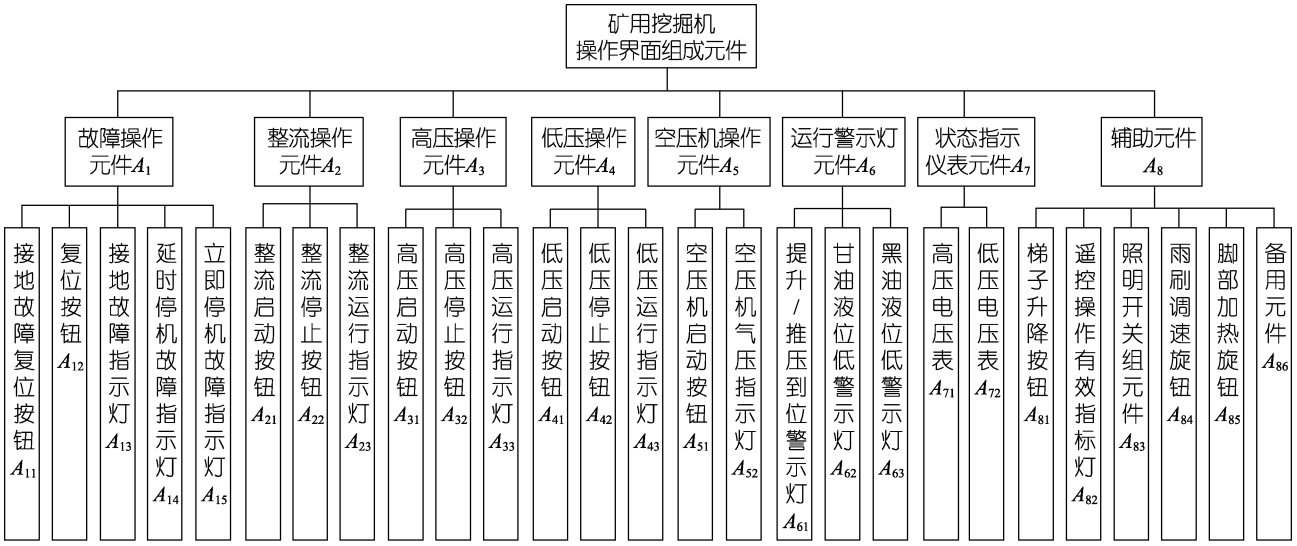

图 4 操作界面组成元件的层次结构

Fig.4 Hierarchy diagram of components of the operation interface

则对应元件的重要性权值为 Z_i，见式（10）。

$$Z_i = \boldsymbol{E} \times \boldsymbol{W}_{\mathrm{a}} \tag{10}$$

2.2.2 待布元件的使用频率权值求解

将矿用挖掘机的操作工况分为 f 种，通过访谈及实地调研得到一小时工作时间内第 l 种工况下待布元件的使用次数矩阵 $\boldsymbol{V}$，其计算见式（11）。

$$\boldsymbol{V} = (v_{li})_{f \times n} \tag{11}$$

操作元件的使用次数为其操作次数，指示元件的使用次数为其观看次数。m 个专家对 f 种工况发生的概率进行评估，采用 1~9 标度法构建起各专家的判断矩阵，计算出第 k 位专家评价的第 f 种工况权值，以此构建原始评价矩阵 $\boldsymbol{W}_{\mathrm{b}}$，见式（12）。

$$\boldsymbol{W}_{\mathrm{b}} = (w_{kl}^{\mathrm{b}})_{m \times f} \tag{12}$$

将 $\boldsymbol{W}_{\mathrm{b}}$ 进行均值化处理得规范化矩阵 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{b}}$，重复式（6）—（9）的步骤计算出各专家间的灰色关联系数 β_{ki} 及专家重要性权重向量 $\boldsymbol{E}$，则元件的使用频率权值 G_i 的计算见式（13）。

$$G_i = \boldsymbol{E} \times \boldsymbol{W}_{\mathrm{b}} \times \boldsymbol{V} \tag{13}$$

2.2.3 待布元件的综合权值求解

待布元件重要程度和使用频率的综合权值 M_i 的计算见式（14）。

$$M_i = \lambda \times Z_i \times G_i \tag{14}$$

式中：λ 为调控参数。

2.3 操作界面布局优化目标函数

2.3.1 操作舒适性数学描述

在矿用挖掘机驾驶过程中，上肢是驾驶人员的主要疲劳部位。根据上肢作业姿势的不同对操作面板及元件进行舒适程度分析，有助于待布元件的科学排布与使用人员的舒适体验。快速上肢评价法[16]（Rapid Upper Limb Assessment，RULA）提供了一种能简单地计算工作中肌肉骨骼系统负荷率和上肢工伤风险的工具，它可在不打断作业人员工作的情况下进行评估，从而量化不同工况任务的工伤风险。RULA 主要从上臂姿势、前臂姿势、手腕姿势、手腕旋转、手部负荷，以及持续时间六大方面来进行用户舒适性评分，评分越高则操作越不舒适。

操作面板的大小和位置会影响操作人员的上臂姿势、前臂姿势，以及手腕姿势，依据这三类作业姿势的不同将操作面板划分为 g 块区域，如图 5 所示。

则操作面板中的第 q 块区域的舒适度权值 B_q 的计算见式（18）。

$$B_q = b_q^{-1} \Big/ \sum_{q=1}^{g} b_q^{-1} \quad (q = 1, 2, \cdots, g) \tag{15}$$

式中：b_q 为采用 RULA 对不同面板区域中人体上臂姿势、前臂姿势，以及手腕姿势的评分和。

矿用挖掘机驾驶人员上肢舒适度除考虑操作面板影响外，还应考虑具体元件的操作舒适度，而这主要与手腕旋转、手部负荷，以及持续时间有关。因此，操作面板中第 i 个待布元件的舒适度权值 H_i 的计算见式（16）。

$$H_i = 1 / h_i \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \tag{16}$$

式中：h_i 为采用 RULA 对人体操作待布元件的手腕旋转、手部负荷，以及持续时间的评分和。

驾驶员的操作舒适度除考虑面板和元件的使用舒适度外，还应考虑元件的重要性和使用频率的综合权值 M_i。将第 i 个待布元件布置于第 q 块区域内，则驾驶人员操作舒适性 C_i 的计算见式（17）。

$$C_i = \sum_{i=1}^{n} M_i B_{iq} H_i \tag{17}$$

2.3.2 视觉舒适性数学描述

视觉注意度是影响驾驶人员作业舒适性的又一重

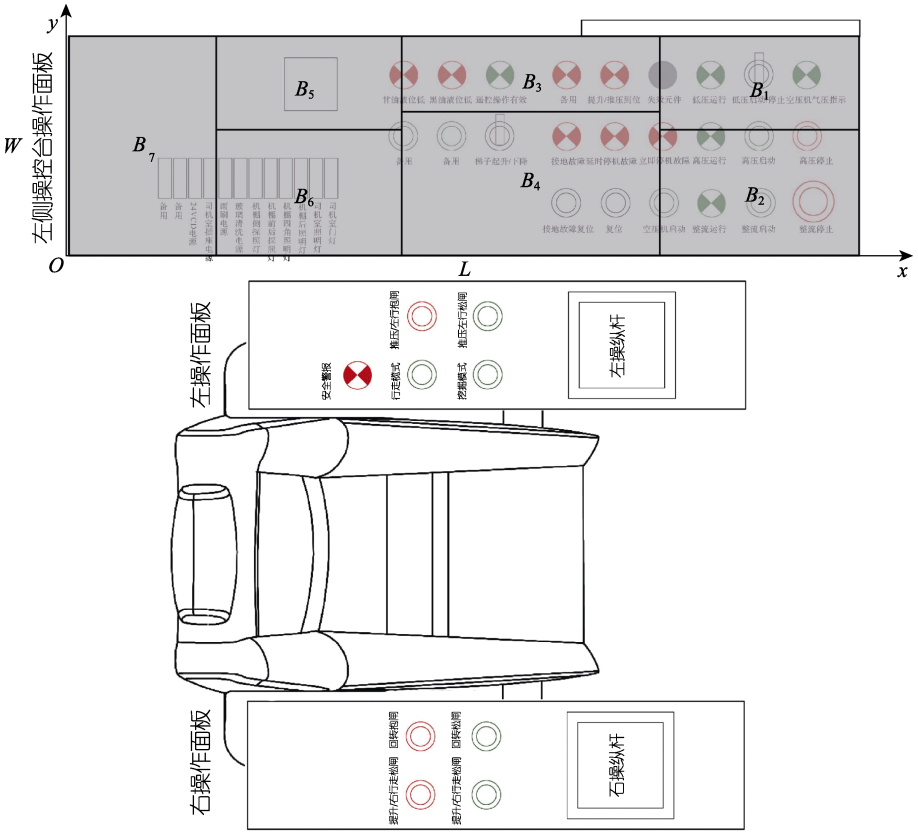

图 5　操作面板区域划分

Fig.5 Operation panel area division

要因素[17]。m 个专家对前述已划分的 g 块面板区域进行 1~10 分的视觉注意度评分，面板区域的视觉注意度越集中则评分越高。第 k 位专家评价的第 q 块面板区域的视觉注意度评分矩阵 $\boldsymbol{W}_c$，其计算见式（18）。

$$\boldsymbol{W}_c = (w_{kq}^c)_{m\times g} \tag{18}$$

将 $\boldsymbol{W}_c$ 进行均值化处理得规范化矩阵 $\boldsymbol{U}_c$。重复式（6）—（9）的步骤计算出各专家间的灰色关联系数 β_{kl} 及专家重要性权重向量 $\boldsymbol{E}$，则面板区域的评分为 R_q，其计算见式（19）。

$$R_q = \boldsymbol{E}\times\boldsymbol{T} \tag{19}$$

对 R_q 进行归一化处理后得到各模块的视觉注意程度值 S_q。将第 i 个待布元件布置于第 q 块区域内，则驾驶人员视觉舒适性 S_i 的计算见式（20）。

$$S_i = \sum_{i=1}^{n} M_i S_{iq} \tag{20}$$

2.3.3　相关性原则数学描述

相关性原则是指将具有功能相关性、几何相关性、物理相关性[18]的待布元件临近布置到同一区域，形成整体感，从而方便操作人员快速寻找。相关元件的成组排列有助于降低用户操作与认知的负荷，进而改善其作业舒适性。如图 3 所示，两元件相关性越高，其在空间布局中的位置应当越近，用 d_{ij} 表示元件 i 与元件 j 的距离，其计算见式（21）。

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \tag{21}$$

待布元件的相关性矩阵 $\boldsymbol{O}$ 的表示见式（22）。

$$\boldsymbol{O} = [o_{ij}] = \begin{bmatrix} o_{11} & o_{12} & \cdots & o_{1n} \\ o_{21} & o_{22} & \cdots & o_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \\ o_{n1} & o_{n2} & \cdots & o_{nn} \end{bmatrix} \tag{22}$$

式中：n 为待布元件个数；o_{ij} 表示元件 i 和元件 j 的相关程度。

根据相关性原则的计算公式可知，O_i 越大则表明元件的布局越符合相关性原则，其计算见式（23）。

$$O_i = \sum_{j=i+1}^{n} (o_{ij} / d_{ij}) \quad (i, j = 1, 2, \cdots, n) \tag{23}$$

2.3.4　总目标函数

布局优化最理想的情况是把每一个待布元件都放在待布空间最优的位置上，使其能正常发挥功效，以确保使用者的操作舒适性。依据上述的数学描述，构建起的操作界面布局优化总目标函数，见式（24）。

$$F(i)_{\text{best}} = \max\left[\sum_{i=1}^{n} (\delta_1 O_i + \delta_2 C_i + \delta_3 S_i)\right] \tag{24}$$

式中：δ 为加权常数，用于操作舒适性、视觉舒适性，以及相关性的权值分配，根据不同的功能任务要求进行选取。

2.4 量子粒子群算法求解

量子粒子群算法（Quantum Particle Swarm Optimization，QPSO）是一种粒子具有量子行为的粒子群算法。在 QPSO 算法中，粒子的状态是由波函数来确定的，它取消了粒子运动方向的属性，粒子位置的更新与粒子先前的运动无关，从而增加了粒子位置的随机性，使得算法具有了良好的全局收敛性能。用量子粒子群优化算法求解人机界面的布局优化模型相较于普通的粒子群算法具有进化方程简单、控制参数少、收敛速度快，以及运算简单等优点。

运用量子粒子群算法求解布局问题，其计算步骤如下。

1）始初化量子粒子群算法的各项参数。对于给定的 m 个粒子组成的粒子群，随机产生服从均匀分布的粒子位置向量 $\boldsymbol{X}_i(t)$（即各元件的随机布局位置），设置 $p_i = X_i$。具体见式（25）。

$$\boldsymbol{X}_i(t) = [X_{i1}(t), X_{i2}(t), \cdots, X_{iD}(t)](i = 1, 2, \cdots, m) \quad (25)$$

2）更新粒子的个体最佳位置 p_i。计算粒子的适应度数值，如果粒子的当前适应度值优于其经历过的个体最优 p_i 的适应度值，则将当前粒子置为 p_i。

3）计算全局最佳位置 g_i。对于所有粒子，找到具有最佳适应度值的粒子，并将其位置作为全局最佳位置 g_i。

4）计算所有个体最佳位置 p_i 的平均值 m_b。

5）更新粒子位置。根据文献[19]中的公式更新粒子的位置，更新后的位置将用于下一次迭代。

6）重复第二至第五个步骤，直至寻找到最优值，输出 p_i，即搜索到的最佳布局形式，算法运行结束。

3 应用验证

以国产 WK55 型号矿用挖掘机驾驶室左侧操作台为例，进行布局优化方法的验证。已知该操作面板长（L）=940 mm，宽（W）=300 mm。考虑到待布元件使用形式的不同，参考操作元件的最小间距来进行姿态空间的尺寸确定，待布元件的尺寸，见表 1。

表 1 待布元件的尺寸数据

Tab.1 Dimensional data of the components to be laid out

待布元件类型	待布元件名称	数量	长（a_i）/mm	宽（b_i）/mm
按钮	接地故障复位按钮、复位按钮、整流启动按钮、高压启动按钮、高压停止按钮、低压启动按钮、低压停止按钮、空压机启动按钮、梯子升降按钮、备用元件	10	60	60
	整流停止按钮	1	80	80
旋钮	雨刷器调速旋钮、脚部加热旋钮	2	68	68
滑动开关	照明开关组元件	1	160	120
仪表	高压电压表、低压电压表	2	100	100
警报指示灯	接地故障指示灯、延时停机故障指示灯、立即停机故障指示灯、整流运行指标灯、高压运行指标灯、低压运行指标灯、空压机气压指标灯、提升/推压到位警示灯、甘油液位低警示灯、黑油液位低警示灯、遥控操作有效指标灯	11	60	60

3.1 矿用挖掘机操作界面布局方案求解

3.1.1 操作面界面布局设计

综合考虑矿用挖掘机的作业任务与操作员的作业需求，选取四名矿用挖掘机驾驶员、两名高级工程师，以及两名高校研究人员作为调查对象。评价小组对矿用挖掘机操作界面组成元件层次结构中的元素进行重要性评判，构建各自的判断矩阵，数据均符合一致性检验要求。采用改进群 AHP-GRA 法求出各专家的权值向量，见式（26）。

$$\boldsymbol{E}_1 = (0.130\,4 \quad 0.126\,7 \quad 0.133\,8 \quad 0.121\,8 \quad 0.122\,3 \quad 0.126\,6 \quad 0.122\,3 \quad 0.116\,0) \quad (26)$$

各待布元件重要性的权值，见式（27）。

$$Z_i = [0.052\,8, 0.043\,0, 0.055\,4, 0.026\,7, 0.050\,3, 0.065\,0, 0.097\,5, 0.039\,9, 0.037\,5, 0.032\,2, 0.017\,3, 0.037\,7, 0.032\,4, 0.017\,4, 0.034\,9, 0.023\,5, 0.071\,5, 0.062\,5, 0.062\,5, 0.056\,0, 0.056\,0, 0.007\,0, 0.005\,8, 0.006\,4, 0.004\,1, 0.002\,9, \ 0.0018] \quad (27)$$

将矿用挖掘机的操作工况分为四种，分别为日间晴天作业、夜间晴天作业、日间雨天作业、夜间雨天作业。评价小组对各工况的概率进行评判，构建各自的判断矩阵，数据均符合一致性检验要求。计算出八位专家评价的四种工况权值，见式（28）。

$$\boldsymbol{W}_{\mathrm{b}}=(w_{kl}^{\mathrm{b}})_{8\times4}=\begin{bmatrix}0.570\,5 & 0.235\,5 & 0.141\,5 & 0.052\,5\\ 0.504\,3 & 0.281\,9 & 0.164\,8 & 0.049\,0\\ 0.615\,0 & 0.210\,3 & 0.131\,7 & 0.043\,0\\ 0.517\,4 & 0.314\,5 & 0.121\,8 & 0.046\,3\\ 0.416\,9 & 0.416\,9 & 0.121\,6 & 0.044\,6\\ 0.402\,7 & 0.402\,7 & 0.128\,8 & 0.065\,8\\ 0.592\,7 & 0.110\,6 & 0.245\,8 & 0.050\,9\\ 0.544\,3 & 0.156\,8 & 0.249\,2 & 0.047\,9\end{bmatrix} \tag{28}$$

采用改进群 AHP-GRA 法求出各专家的权值系数，见式（29）。

$$\boldsymbol{E}_2=(0.142\,8\ \ 0.172\,6\ \ 0.117\,5\ \ 0.139\,1\ \ 0.104\,4\ \ 0.094\,3\ \ 0.110\,0\ \ 0.119\,3) \tag{29}$$

各待布元件使用频率的综合权值，见式（30）。

$$G_i=(0.027\,5, 0.730\,4, 0.027\,5, 0.730\,4, 0.730\,4, 0.696\,9, 0.781\,8, 0.6969, 0.410\,0, 0.410\,0, 0.410\,0, 0.410\,0, 0.410\,0, 0.410\,0, 0.971\,8, 0.971\,8, 30.326\,8, 1.181\,3, 1.181\,3, 2.525\,3, 2.525\,3, 0.659\,5, 0.041\,2, 1.512\,4, 0.433\,5, 0.037\,8, 0.012\,1) \tag{30}$$

各待布元件重要性与使用频率的综合权值，见式（31）。

$$M_i=\lambda\times Z_i\times G_i=(0.145\,0, 3.143\,5,\ 0.152\,4, 1.952\,1, 3.674\,5, 4.530\,0, 7.623\,9, 2.777\,7, 1.538\,9, 1.318\,6, 0.708\,0, 1.547\,5,\ 1.327\,1, 0.712\,5, 3.388\,5, 2.278\,9, 219.100\,0, 7.388\,0, 7.388\,0, 14.141\,1, 14.141\,1, 0.459\,3, 0.024\,0, 0.970\,0, 0.017\,61, 0.010\,9, 0.002\,2) \tag{31}$$

式中：$\lambda=100$。

将操作面板根据驾驶人员上肢作业姿势的不同分出七个模块，求出操作面板中不同面板模块的操作舒适度权值，见式（32）。

$$B_q=(0.081\,6, 0.114\,2, 0.190\,3, 0.285\,5, 0.114\,2, 0.142\,8, 0.071\,4) \tag{32}$$

求出操作面板中不同面板模块的视觉舒适度权值，见式（33）。

$$S_q=(0.233\,8, 0.200\,9, 0.146\,1, 0.168\,1, 0.109\,6, 0.091\,0, 0.050\,4) \tag{33}$$

以矿用挖掘机操作面板的某一顶点为中心建立直角坐标系，待布元件在面板上的中心点坐标(x_i, y_i)为布局求解过程中的变量。运用量子粒子群算法求解目标函数，对矿用挖掘机操作界面的布局进行优化，其优化后输出的结果，见表 2。

表 2　布局方案的结果

Tab.2 Results of the layout scheme

元件名称及编号	方案一		方案二		方案三	
	x_i /mm	y_i /mm	x_i /mm	y_i /mm	x_i /mm	y_i /mm
接地故障复位按钮 A_{11}	362.31	109.18	448.12	47.63	473.78	108.94
复位按钮 A_{12}	383.90	42.22	480.81	50.03	458.07	42.79
接地故障指示灯 A_{13}	377.74	177.83	397.18	113.32	459.89	184.91
延时停机故障指示灯 A_{14}	443.61	207.29	472.96	124.28	384.18	252.91
立即停机故障指示灯 A_{15}	349.98	249.03	496.04	178.71	456.87	247.45
整流启动按钮 A_{21}	667.19	123.01	547.29	42.23	681.41	125.09
整流停止按钮 A_{22}	694.72	51.98	629.12	274.87	687.33	51.91
整流运行指标灯 A_{23}	688.22	193.97	705.11	41.99	689.12	192.43
高压启动按钮 A_{31}	525.27	123.39	560.83	169.97	545.81	116.50
高压停止按钮 A_{32}	539.71	32.52	630.79	185.74	527.64	48.13
高压运行指标灯 A_{33}	545.80	187.32	702.31	176.09	535.67	178.87
低压启动按钮 A_{41}	600.23	120.24	551.67	107.44	616.19	108.82
低压停止按钮 A_{42}	612.83	145.81	626.31	123.32	593.31	42.63
低压运行指标灯 A_{43}	621.39	194.89	702.09	108.72	610.03	174.81
空压机启动按钮 A_{51}	467.91	41.81	479.61	251.70	390.84	45.44
空压机气压指标灯 A_{52}	461.83	117.96	554.03	251.09	406.87	114.83
提升/推压到位警示灯 A_{61}	785.93	44.12	773.82	51.37	766.21	56.47
甘油液位低警示灯 A_{62}	669.83	258.57	698.23	237.43	645.27	252.70
黑油液位低警示灯 A_{63}	592.78	267.59	629.67	253.48	564.11	250.56
高压电压表 A_{71}	763.94	220.97	796.02	213.82	773.88	219.02
低压电压表 A_{72}	791.82	129.53	786.21	127.81	788.79	128.69
梯子升降按钮 A_{81}	268.19	120.03	326.71	128.29	324.51	42.81

续表 2

元件名称及编号	方案一		方案二		方案三	
	x_i /mm	y_i /mm	x_i /mm	y_i /mm	x_i /mm	y_i /mm
遥控操作有效指标灯 A_{82}	515.23	257.03	411.18	182.72	385.38	182.47
照明开关组元件 A_{83}	242.32	203.22	308.71	205.83	251.30	128.36
雨刷器调速旋钮 A_{84}	185.55	44.38	327.26	42.31	175.62	47.31
脚部加热旋钮 A_{85}	260.46	48.51	250.08	46.05	251.87	45.62
备用元件 A_{86}	178.72	120.45	259.87	112.36	251.21	128.39

在给定的人机界面待布空间中，依据算法求解的数据对三个方案中各元件对应的中心坐标进行绘制。观察结果可发现，综合权重相对较高的操作元件均布置在舒适度较高的区域内，显示元件布置在视觉注意度高的区域，相关性较高的元件就近布置，且待布元件中心点到待布空间边界的距离均大于其半径。由此可知，待布结果的输出满足目标函数的运算规则。

由于待布元件中心坐标在待布空间中的排列相对随机，缺乏美观性和规律性。因此，依据算法求解的布局结果，结合操控台面板大小及各元件中心点位在空间中的布局间隔，输出操控台二维平面布局。

对于具有较多待布元件的面板，在设计中需对其进行区域划分[20]。常见的面板功能区域划分方法有分离法、括线法、线框法、色块法、分面法等，本文采用色块法将相关性较强的待布元件进行分区归类。

3.1.2 操作界面色彩设计

人机界面设计需要实现用户心理模型与设备概念模型间良好的匹配，色彩设计对设备编码具有显著优势。在操作面板方面，需要用色彩的明度对比来突出待布元件的能见度。参考现有的操作界面，依据前述驾驶人员的舒适操作区域，结合待布元件的布局位置，将重要性高但使用频率较低的元件组合采用深灰色分区，如故障操作元件等，以方便机器出现故障时人员迅速定位。重要性较高且使用频繁的元件组合，如整流、低压、高压操作等元件，其位置处于驾驶人员的最佳操作区，采用中灰色来进行分区即可。其余元件组合使用浅灰色来分区。在待布元件方面，元件的色彩特性能表达不同的视觉信息，各元件的色彩方案如表 3 所示。

3.1.3 操作界面文字设计

用文字符号标示待布元件的功能、用途、范围等，可有效避免误操作并提高用户的操作效率。文字符号的可视性取决于字形、尺寸、布局，以及与背景的对比度等。方案中多采用横向排列的规整字体进行元件标识，以提升驾驶人员的识别速度。在深色区域采用白色字体进行突出和强调，在浅色区域则采用深色字体。矿用挖掘机操作界面的最终方案如图 6 所示。

表 3 布局方案的结果

Tab.3 Results of layout scheme

色彩	感性意向	映射含义	元件名称
红色	热情、危险	危险、停止、故障、引起注意	接地故障指示灯、立即停机故障指示灯、整流停止按钮、高压停止按钮、低压停止按钮、提升推压到位警示灯
绿色	温和、舒缓	安全、正常	整流启动按钮、整流运行指示灯、高压启动按钮、高压运行指示灯、低压启动按钮、低压运行指示灯、空压机启动按钮、空压机气压指示灯、梯子升降按钮、遥控操作有效指示灯、备用元件
黄色	灿烂、活泼	警示	延时停机故障指示灯、甘油液位低警示灯、黑油液位低警示灯
灰色	内敛、朴素	无特殊意义	雨刷器调速旋钮、脚部加热旋钮
黑色	沉稳、权威	复原、归零	接地故障复位按钮、复位按钮

a 方案一 b 方案二 c 方案三

图 6 操作台布局方案

Fig.6 Layout scheme for the operation console

3.2　模糊评价与方案优选

模糊综合评价[21]可将难以量化的模糊定性评价标准转化为定量评价，以此为依据评判方案优劣。客观的结果有助于研究者做出合理决策。应用模糊综合评价法验证布局方案的合理性，邀请 10 名熟练掌握矿用挖掘机操作规范的驾驶人员，对现有方案与原方案进行对比评价。拟定布局合理性、可达性、操作便捷性、视觉舒适性、误触评估作为矿用挖掘机操作界面评价的主要因素集。专家评语集则借鉴模糊数学的常用评语。因素集和评语集如下。

1）因素集 $D=\{d_1,d_2,d_3,d_4,d_5\}=$ {合理性，可达性，操作舒适性，定位速度，误触评估}

2）评语集 $F=\{f_1,f_2,f_3,f_4,f_5\}=$ {优秀，良好，一般，较差，很差}。

根据专家调研结果，因素集内各指标权重向量 $\boldsymbol{A}$，见式（34）。

$$\boldsymbol{A}=(0.15\ \ 0.24\ \ 0.31\ \ 0.12\ \ 0.19) \tag{34}$$

10 位驾驶人员对操作界面布局方案的平均打分如表 4 所示。

依据专家打分结果构建各个方案的多因素评价标准矩阵 $\boldsymbol{C}$，运用模糊数学矩阵间的乘法运算规则对评价结果进行计算，各方案打分计算见式（35）。

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{C} \tag{35}$$

1）方案一结果见式（36）。

$$\boldsymbol{B}_1=(0.703\ \ 0.227\ \ 0.07\ \ 0\ \ 0) \tag{36}$$

2）方案二结果见式（37）。

$$\boldsymbol{B}_2=(0.563\ \ 0.296\ \ 0.103\ \ 0.038\ \ 0) \tag{37}$$

3）方案三结果见式（38）。

$$\boldsymbol{B}_3=(0.616,\ 0.238,\ 0.111,\ 0.035,\ 0) \tag{38}$$

4）原方案结果见式（39）。

$$\boldsymbol{B}_0=(0.579,\ 0.22,\ 0.151,\ 0.05,\ 0) \tag{39}$$

由专家评价结果可知，新的布局方案均得到了较高的认可，其中方案一最优。从专家打分结果及专家意见汇总可知，方案一的优越性主要在于布局合理性及操作舒适度上。方案一中各操作元件功能划分明显，方便定位，且操作流畅度上优于原有布局。在定位速度表现方面，方案一略差于原有布局，原因在于驾驶人员已对原有布局形成操作惯性，因此定位速度更快。

表 4　专家打分结果
Tab.4 Expert scoring results

评价指标	方案一					方案二					方案三					原方案				
	优秀	良好	一般	较差	很差	优秀	良好	一般	较差	很差	优秀	良好	一般	较差	很差	优秀	良好	一般	较差	很差
布局合理性	6	3	1	0	0	5	3	1	1	0	7	3	0	0	0	4	2	4	0	0
可达性	7	2	1	0	0	6	4	0	0	0	6	2	2	0	0	5	3	1	1	0
操作便捷性	8	2	0	0	0	8	1	1	0	0	8	2	0	0	0	5	2	2	1	0
视觉舒适性	7	3	0	0	0	5	3	2	0	0	5	2	2	1	0	9	1	0	0	0
误触评估	7	2	1	0	0	4	3	2	1	0	5	3	1	1	0	7	2	1	0	0

综上，方案一的整体设计满足人机界面效果评价及布局初衷。

4　结语

结合快速上肢评价法与量子粒子群算法的人机界面布局优化方法，实现了布局方案舒适性求解的智能化。该方法虽在求解同类复杂空间布局方面具有相对优势，但目前求解主要适用于二维平面布局的输出，对涉及高度的三维空间还需引入更多的参数进行迭代，且现阶段目标函数的构建着重于操作人员的舒适性，对其他布局原则的考虑有所欠缺。

今后，该研究工作的重点是将人体舒适性因素与其他布局原则结合起来，构建多因素的布局优化数学模型，并在算法求解过程中耦合多目标优化，从而获得符合设计原则的最优解集。

参考文献：

[1] 王雅坤，任家骏，李爱峰，等. 矿用挖掘机操作界面的 GEM-AHP 法决策评价[J]. 机械设计与制造，2023(2): 20-23.
WANG Ya-kun, REN Jia-jun, LI Ai-feng, et al. GEM-AHP Decision-making Evaluation of Mining Excavator Operation Interface[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019, 39(3): 797-804.

[2] 毛亮，薛月菊，林焕凯，等. 一种基于视频图像的挖掘机工作状态识别方法[J]. 系统工程理论与实践，2019, 39(3): 797-804.
MAO Liang, XUE Yue-ju, LIN Huan-kai, et al. A Recognition Method of Working State of Excavator Based on Video Image[J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 2019, 39(3): 797-804.

[3] 孟浩南，任家骏，李爱峰，等. 排土机操作界面的布局优化设计分析[J]. 机械设计与研究, 2020, 36（6）: 159-165.
MENG Hao-nan, REN Jia-jun, LI Ai-feng, et al. Research on Layout Optimization Design of Operation Interface Layout in Spreader[J]. Mechine Design and Research, 2020, 36(6): 159-165.

[4] ONSORODI A H H, KORHAN O. Application of a Ge-

netic Algorithm to the Keyboard Layout Problem[J/OL]. PLOS ONE, 2020, 15(1): e0226611 [2023- 04-02]. http://webvpn.xust.edu.cn/https/77726476706e69737468656265737421e7e056d230356a5f781b8aa59d5b20301c1db852/wos/alldb/full-record/WOS:000517271400001

[5] HAO L, CHUNG W J. Human-machine Interface Visual Communication Design Model of Electronic Equipment Using Machine Vision Technology[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 2022: 1-9.

[6] 王大颜, 瞿珏, 王崴, 等. 防空反导装备指控舱显控台界面布局优化设计与评价[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(5): 104-111.
WANG Da-yan, QU Jue, WANG Wei, et al. An Optimal Design and Evaluation of Interface Layout of Air Defense Anti-missile Equipment Command Module Display and Control Platform[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(5): 104-111.

[7] 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 Lei, LYU Jian, PAN Wei-jie, et al. User Interface Layout Optimization Incorporating Cognitive Load[J]. Computer Systems and Applications, 2022, 31(7): 307-315.

[8] 王旭, 姜兴宇, 杨国哲, 等. 基于可达域的激光增材制造装备人机界面布局优化研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(2): 317-330.
WANG Xu, JIANG Xing-yu, YANG Guo-zhe, et al. Optimization of Human-machine Interface Layout of Laser Additive Manufacturing Equipment Based on Reachable Domain[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(2): 317-330.

[9] 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.
WEI Xi, SUN Jing. Non-equal Area Interface Layout Optimization Methods with Geometric Constraints[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(24): 75-86.

[10] 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[J]. 包装工程, 2020, 41(8): 149-153.
KANG Hui, YANG Sui-xian, DENG Shu-wen, et al. Multi-objective Optimization Design of Product Operation Interface Element Layout[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(8): 149-153.

[11] 王雅坤, 任家骏, 李爱峰, 等. 矿用挖掘机驾驶室操作界面的布局优化设计[J]. 工程设计学报, 2020, 27(4): 469-477.
WANG Ya-kun, REN Jia-jun, LI Ai-feng, et al. Layout Optimization Design of Operation Interface in Mining Excavator Cab[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2020, 27(4): 469-477.

[12] 冯青, 张承媛, 余隋怀, 等. NSGA-Ⅱ算法与能量法相结合的舰艇居住舱室布局优化研究[J/OL]. 机械科学与技术, 2022, 4(11): 1-8 [2023-04-03]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhTDCdPD67y4xD6PmEHDWG96-CD4lqXuuAJj1pJl8-Z9-ikmupMs0bH4eSOEpfr&uniplatform=NZKPT.
FENG Qing, ZHANG Cheng-yuan, YU Sui-huai, et al. Research on Residential Cabin of Naval Ship Space Layout by Combining Energy Method and NSGA-II Algorithm[J/OL]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering: 1-8 [2023-04-03]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhTDCdPD67y4xD6PmEHDWG96-CD4lqXuuAJj1pJl8-Z9-ikmupMs0bH4eSOEpfr&uniplatform=NZKPT.

[13] 何思俊, 支锦亦, 杜洋, 等. 装备驾驶界面人机设计评价研究综述[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(5): 97-103.
HE Si-jun, ZHI Jin-yi, DU Yang, et al. A Review of Research on Man-machine Design Evaluation of Equipment Driving Interface[J]. Mechine Design and Research, 2019, 35(5): 97-103.

[14] 范建平, 朱兆钰, 吴美琴. 一种新的基于群 AHP 和 DEA 的距离测度方法[J]. 统计与决策, 2018, 34(21): 41-45.
FAN Jian-ping, ZHU Zhao-yu, WU Mei-qin. A New Distance Measure Method Based on Group AHP and DEA[J]. Statistics and Decision, 2018, 34(21): 41-45.

[15] 冯青, 范丁力, 杨惠珺, 等. 认知负荷下的智慧矿山信息交互界面优化[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(5): 1028-1036.
FENG Qing, FAN Ding-li, YANG Hui-jun, et al. Optimization of Intelligent Mine Information Interaction Interface Based on Cognitive Load[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(5): 1028-1036.

[16] KEE D. Systematic Comparison of OWAS, RULA and REBA Based on a Literature Review[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(1): 595.

[17] 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[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(3): 416-421.
YE Kun-wu, BAO Han, WEI Si-dong. Layout Optimization for Aircraft Cockpit Man-machine Interface Based on Visual Attention Distribution[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 50(3): 416-421.

[18] 刘浩, 张磊, 徐宏斌, 等. 地面无人武器站中的模块划分方法[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(1): 8-13.
LIU Hao, ZHANG Lei, XU Hong-bin, et al. Module Partition Method of Unmanned Ground Weapon Station[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(1): 8-13.

[19] 崔奥, 黄金娥, 黄祥兵, 等. 基于量子粒子群算法的船舶机舱布局方法[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(18): 51-56.

CUI Ao, HUANG Jin-e, HUANG Xiang-bing, et al. A Method of Ship Engine Room Layout Based on Quantum Particle Swarm Algorithm[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(18): 51-56.

[20] 张宏瑞，任家骏，李爱峰，等. 大型矿用挖掘机操作界面的优化设计研究[J]. 图学学报, 2019, 40(4): 796-801.
ZHANG Hong-rui, REN Jia-jun, LI Ai-feng, et al. Study on Optimal Design of Operating Interface of Large Mining Excavator[J]. Journal of Graphics, 2019, 40(4): 796-801.

[21] 李铁，张文虎，张帅军. 基于 GA-MaxEnt 权重的产品模糊综合评价[J]. 制造业自动化, 2023, 45(3): 34-37.
LI Tie, ZHANG Wen-hu, ZHANG Shuai-jun. Fuzzy Comprehensive Evaluation of Products Based on Maximum Entropy Weight of Genetic Algorithm[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(3): 34-37.

责任编辑：蓝英侨

（上接第 108 页）

[16] LEE B, WU S, REYES M J, et al. The Effects of Interruption Timings on Autonomous Height-adjustable Desks that Respond to Task Changes[C]// Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM, 2019.

[17] 丁一，郭伏，胡名彩，等. 用户体验国内外研究综述[J]. 工业工程与管理, 2014, 19(4): 92-97.
DING Yi, GUO Fu, HU Ming-cai, et al. A Review of Uer Experience[J]. Industrial Engineering and Management, 2014, 19(4): 92-97.

[18] BRADLEY M M, LANG P J. Measuring Emotion: The Self-assessment Manikin and the Semantic Differential[J]. Molecular Psychiatry, 1994, 25(1): 49-59.

[19] 吴磊，孙悦. 基于 PAD 情感模型的老龄智能陪伴机器人面部表情评估研究[J]. 包装工程, 2021, 42(6): 53-61.
WU Lei, SUN Yue. Facial Expression Measurement of Aging Intelligent Companion Robot Based on PAD Emotion Model[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(6): 53-61.

[20] TIANHUA X, MINGLIANG C, ZHIGENG P. Applying Self-assessment Manikin (SAM) to Evaluate the Affective Arousal Effects of VR Games[C]// ACM, Proceedings of the 2020 3rd International Conference on Image and Graphics Processing. New York:ACM, 2020.

[21] 吴彬星，孙雨生，张智君. 产品可用性测试中的情绪评价[J]. 应用心理学, 2015, 21(1): 87-96.
WU Bin-xing, SUN Yu-sheng, ZHANG Zhi-jun. Emotion Evaluation in Product Usability Testing[J]. Chinese Journal of Applied Psychology, 2015, 21(1): 87-96.

[22] RIEK L D. Wizard of Oz Studies in HRI: A Systematic Review and New Reporting Guidelines[J]. Journal of Human-robot Interaction, 2012, 1(1): 119-136.

责任编辑：蓝英侨