

基于深度学习的核电人机界面美学评价方法研究

武江, 潘国君, 傅圣威, 沈超, 王燕
中广核研究院有限公司, 广东 深圳 518000
DOI:10.61369/EPTSM.2025020022

摘 要 : 本研究针对核电主控室人机界面 (HMI) 美学评价缺乏量化标准的问题, 提出基于深度学习的多模态美学评价方法。通过运用定量方法, 从留白率、垂直对称性、平衡感、比例感、整体感、简单感等维度对比分析典型系统新旧版核电主控室人机界面的美学指标, 深入评估新版人机界面元素布局设计的美学效果, 并据此结合深度学习技术建立适用于核电 HMI 设计的美学评价系统。研究成果为核电 HMI 设计提供数据驱动的美学优化路径, 符合第三代核电系统认知工效学设计要求, 对核电厂人机界面设计研究具有现实的指导意义。

关 键 词 : 人机界面; 深度学习; 美学评价

Research on Aesthetic Evaluation Method of Nuclear Power Human-Machine Interface Based on Deep Learning

Wu Jiang, Pan Guojun, Fu Shengwei, Shen Chao, Wang Yan
China General Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract : This study addresses the lack of quantitative standards for the aesthetic evaluation of human-machine interfaces (HMI) in nuclear power plant main control rooms by proposing a deep learning-based multimodal aesthetic evaluation method. Using quantitative methods, it conducts a comparative analysis of aesthetic metrics—such as whitespace ratio, vertical symmetry, sense of balance, sense of proportion, sense of unity, and sense of simplicity—between typical old and new versions of nuclear power plant main control room HMIs. The study thoroughly evaluates the aesthetic effectiveness of the element layout design in the new HMI and, based on this, combines deep learning techniques to establish an aesthetic evaluation system tailored for nuclear power HMI design. The research results provide a data-driven path for aesthetic optimization of nuclear power HMIs, aligning with the cognitive ergonomic design requirements of third-generation nuclear power systems. The findings offer practical guidance for research on human-machine interface design in nuclear power plants.

Keywords : human-machine interface; deep learning; aesthetic evaluation

引言

随着先进的自动控制技术及智能信息处理技术的迅猛发展, 第三代数字化核电主控室软件系统的自动化和智能化水平得到了大幅提升。相较于前两代系统, 第三代系统在人机交互方面实现了质的飞跃, 从单一参数、单一目标的控制模式演进至多参数、多目标的控制模式。这一变革使得操纵员在执行任务时, 所需处理的信息量和任务种类显著增加, 对复杂人机界面信息元素布局提出了更为严苛的要求。优秀的界面设计能降低认知负荷, 提升操作准确性, 引导快速决策, 从而保障核电站安全稳定运行。

伴随着人工智能技术的迅猛发展, 依赖深度学习的计算美学算法逐渐走入人们的视野。这些算法旨在通过计算机模拟人类的视觉审美过程, 从而协助设计师进行界面美学评估。然而, 要想使这些方法具备足够的评估精度, 必须经过大量的样本学习和模型训练, 这是一个复杂且需要时间的过程, 但它的潜力为设计领域带来了新的可能性。

一、核电人机界面美学研究现状

在当前工业设计领域的人机界面设计研究和实践中, 美学评价始终占据着核心地位, 它是实现人性化设计的关键因素。在核

电主控室中, 人机界面作为操纵员与系统信息交互的物质基础, 其设计水平不仅深刻影响着操纵员的态势感知, 更是提升人机交互系统绩效的有效途径之一。大量核电工程实践表明, 有效的控制室人因工程设计与友好的人机界面对减少人因失误、提高核电

厂的利用率具有积极作用^[1]，即核电主控室人机界面设计对于确保操纵员的高效操作和安全管理至关重要。

现有核电人机界面主要是基于工艺流程图设计，在设计验证方面仅从人因工程角度进行验证，旨在降低操纵员在操作过程中的人因失误。因此，在设计核电主控室人机界面时，设计师需充分考虑操纵员的工作习惯、认知特点及心理需求，而忽略了人机界面美学的设计，从而使操作者的操作体验及态势感知能力欠佳。

二、人机界面美学评价理论

（一）美学评价理论

美学评价理论研究如何系统科学地评价美学对象，包含基本概念、方法和维度，探讨主观性与客观性。在应用于核电人机界面（HMI）时，为构建科学合理的评价体系提供理论支撑。现有研究提出了多种方法度量界面设计的美度。其中，多数研究采用问卷调查、用户访谈和观察、专家评估或生理监测等基于个体经验的评估方法^[2]。相较于依赖个体主观经验的界面美度评估方法，计算美学致力于开发计算模型，以实现界面美度的客观评估。这种方法具有客观性、量化性以及标准化等优点，并且能够集成到界面开发环境中，实现快速和自动化的评估。正因如此，计算美学逐渐崭露头角，成为一门备受关注的新兴交叉学科，在界面美度评估研究中占据了重要地位。

（二）人机界面美度指标

以往的人机交互设计评估常以用户学习时长、错误率和任务完成时间为标准。近年来，学术界与设计专业人士转向关注界面设计内在要素对用户体验的影响。为了构建“设计—感性”间的映射关系，学者们分别针对色彩、图像、按钮、图案、文字、字体、超级链接、动态效果等界面造型元素，以及视觉平衡感、趣味感、吸引力、忠诚度、信任度等多种较为主观的用户感知体验展开了研究^[3-8]。

三、构建核电人机界面美学评价指标体系

本研究旨在结合传统方法和现代技术可以构建一个适用于核电人机界面美学评价的综合评价体系。综合运用图形学、系统工程学、心理物理学等理论和方法^[9]，从界面布局出发对影响操纵员美感体验的界面元素进行抽象提炼，通过对该元素表征指标的控制，不断优化界面布局、交互方式和视觉元素，以打造出既美观又实用的人机界面。

（一）选取核电人机界面美学评价指标

结合认知心理学提出的人类认知加工的形状优势，综合考虑核电主控室人机界面布局设计和评价方法解释效力，对 UI 设计行业现有用于表征界面美度意向因子指标的 13 个界面美度指标进行筛选与整合，选择平衡感（BA，Balance）、垂直对称性（VS，Vertical Symmetry）、整体感（UN，Unity）、简单感（SI，Simplicity）、留白率（WS，White Space）、比例美感（PR，

Proportion）6 项界面美度指标，作为适用于核电数字化人机界面元素布局的美学评价指标体系。

（二）确定美学指标计算方法

对核电主控室人机界面进行功能分区和抽象表征，可实现元素精准定位。如图 1 所示，界面划分多个最小矩形区域，各含内部元素。通过确定每个矩形的 x、y 坐标及宽、高参数，精确定位各元素。抽象元素属性用元组 (xi,yi,wi,hi) 表示，元素总数为 n。结合图例，构建六项界面美度指标公式，值在 0 到 1 间，实现美观度量化评估。

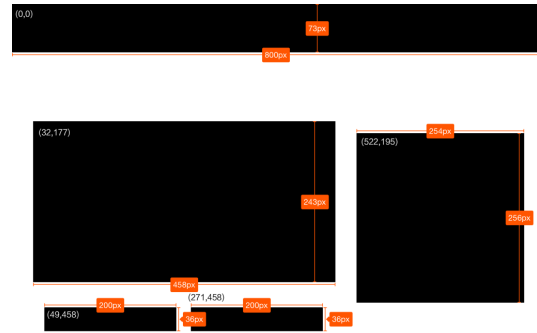


图1 核电人机界面元素的表征和定位

1. 平衡感（BA）

平衡感指界面中元素的视觉重量的分布程度。该指标的量化思路为比较界面水平对称轴和垂直对称轴两侧的视觉重量差异。可将界面划分为左上、左下、右上、右下四个象限，每个象限权重相同。具体计算公式如下：

$$BA = 1 - \frac{|BA_{vertical}| + |BA_{horizontal}|}{2} \in [0,1]$$

$$BA_{vertical} = \frac{W_L - W_R}{\max(|W_L|, |W_R|)}$$

$$BA_{horizontal} = \frac{W_T - W_B}{\max(|W_T|, |W_B|)}$$

$$W_j = \sum_i^{n_j} a_{ij} d_{ij}, j = L, R, T, B$$

其中，L，R，T 和 B 分别表示界面空间垂直对称轴左侧、垂直对称轴右侧、水平对称轴上方和水平对称轴下方区域； a_{ij} 表示第 i 个抽象元素在 j 区域的面积， d_{ij} 表示元素中心线和界面中心线间的距离； n_j 表示界面空间某一区域包含的抽象元素个数。

2. 垂直对称性（VS）

垂直对称性指界面的垂直中心线两侧的元素相似程度。即过界面的对角线焦点的垂线将界面分为左右两个部分，将左右两侧的元素以这条垂线为对称轴进行镜像复制，复制后的元素与对侧元素重合的面积占对侧所有元素面积的比例。该指标的量化思路为利用图像处理的方式将界面原图转换为“二值化图像”（其中，元素的灰度值为 255，背景的灰度值为 0），统计界面中沿界面垂直对称轴呈对称关系且具有相同灰度值的像素点数目，并计算其占界面总像素点的比例。具体计算公式如下：

$$VS = \frac{n_c}{n_R}$$

其中， n_c 表示界面中满足条件的像素点数目， n_R 界面垂直中线右侧区域所有界面元素的像素点数目。

3. 整体感 (UN)

整体感指界面元素分布的紧凑程度。该指标由两个因素共同决定，一是界面元素尺寸的相似性，二是界面元素布局的紧凑性。具体计算公式如下：

$$UN = \frac{|UN_{form} + UN_{space}|}{2} \in [0,1]$$

$$UN_{form} = 1 - \frac{n_{size} - 1}{n}$$

$$UN_{space} = 1 - \frac{a_{layout} - \sum_i^n (w_i \times h_i)}{W \times H - \sum_i^n (w_i \times h_i)}$$

其中， UN_{form} 表示界面元素之间尺寸的相似程度， n_{size} 表示界面中的元素尺寸的个数（不计算重复的元素尺寸）， n 表示界面中元素的总个数； UN_{space} 表示界面元素布局的紧凑程度， a_{lavo} 表示界面中所有元素的外接矩形的面积， w 和 H 分别表示界面截图的宽度和高度， w_i 和 h_i 分别表示界面中各元素的宽度和高度。

4. 简单感 (SI)

简单感指界面元素的对齐和组合化程度。该指标的量化思路为记抽象元素左上角顶点的坐标为 (x_i, y_i) ，分别计算左上角顶点坐标中 x_i 或 y_i 相同的点的抽象元素数量，即垂直对称或水平对齐的点的数量。具体计算公式如下：

$$SI = \frac{n_{vertical} + n_{horizontal}}{4n} \in [0,1]$$

其中， $n_{vertical}$ 和 $n_{horizontal}$ 分别表示界面中垂直和水平方向对齐的元素的数量， n 表示界面中元素的总个数。

5. 留白率 (WS)

留白率指界面中不传递信息的部分在整个页面中的比重。该指标有两种量化思路：一是基于像素点的量化方式，计算不传递信息的像素点占界面中所有像素点的比例；二是基于抽象元素面积的量化方法，将界面元素抽象为矩形，计算界面中抽象元素之外的空白区域的面积占界面总面积的比例。经讨论，由于本次评价过程不考虑界面元素的具体内容和色彩，且对每个界面元素进行了抽象处理，因此选择第二种基于抽象元素面积的量化方法进行指标计算。具体计算公式如下：

$$WS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n w_i \times h_i}{W \times H}$$

其中， n 表示界面中元素的总个数， w_i 和 h_i 分别表示界面中各元素的宽度和高度， W 和 H 分别表示界面截图的宽度和高度。

6. 比例美感 (PR)

比例美感指界面元素和界面布局间的比例值与“美度比例”

间的相似程度。该指标的量化思路为统计界面中抽象元素宽高比（数值大的为分子，数值小的为分母）属于公认的优质比例的元素个数，并计算符合条件元素的个数和界面元素总个数的比值。具体计算公式如下：

$$PR = \frac{n_c}{n}$$

其中， n_c 表示界面中宽高比在保留一位小数后属于集合{1,1.3,1.4,1.6,1.7,2,2.4,2.6,3.3}的抽象元素的个数， n 表示界面中元素的总个数。

四、构建基于深度学习的美学评价系统

为提升界面美度计算评估过程的客观性与科学性，实现利用深度学习模型对界面的视觉美学进行量化评估，在界面美度计算体系的理论上运用 Python/MATLAB 语言建立人机界面美度计算原型系统，系统功能界面如图2所示。该系统包含界面信息编码和美度指标计算模块，实现界面功能区块位置信息检索、元素抽象化及美度计算等功能。

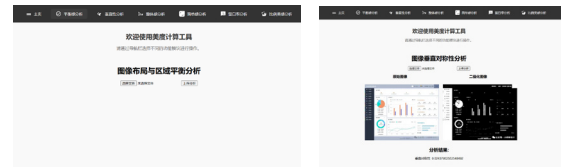


图2 核电主控室人机界面美学评价系统

五、核电人机界面美学评价实验与结果分析

考虑到核电主控室人机界面中的信息呈现需求是由规程和操作需求决定的，界面中的留白率主要是受信息呈现需求量决定，不属于可调整的界面设计范围，且相关文献会减去留白率，把其他指标作为界面综合美度的计算方法，所以本章中综合美度计算分析主要采用前五个美度指标，并赋予各指标相同权重，对新旧版核电典型系统人机界面进行综合界面美度指标分析，分析结果如表1所示。

表1 新版和旧版界面综合指标总分结果

界面编号	新版界面	旧版界面
S5	2.60	2.20
S7	1.96	1.60
S8	1.86	1.32
S9	2.55	1.74
S10	2.33	1.92
S19	2.40	2.21
S25	2.45	1.61
系统导航	2.49	0.95

从美度综合指标上看，新版界面综合美度均优于旧版界面，这表明新版界面在整体美学评价上比旧版界面有较大提升，结合留白率数据结果，新版界面能够在提高界面美感的同时增加信息传递率，这对用户界面操作体验及识别读取有着较高的优化提升。

六、结论与展望

本文分析了核电人机界面设计美学评价理论及研究现状，建立适用于核电 HMI 设计美学评价的指标体系，并基于深度学习原理，运用 Python/MATLAB 语言建立人机界面美度计算原型系统，通过对新旧版人机界面美度指标的实验测试及对比分析，有效验证了该核电主控室 HMI 美学评价系统的可用性。

在未来的 HMI 设计中，希望在结合最新的设计科学、神经科

学、认知心理学、认知神经科学的研究成果的基础上，运用界面认知理论分析、界面脑电实验研究和实例验证的方法^[10]，围绕界面信息的布局原则与操纵员用户认知机制，设计更符合用户使用习惯的人机界面及信息系统，真正实现以人为中心的人机交互设计理念在核电主控室中的工程应用。

参考文献

-
- [1] 夏春艳, 颜声远, 李庆芬, 等. 核电厂主控室人机界面评价实验研究 [J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(8): 109-114.
- [2] 储程, 董占勋. 基于马田系统的人机界面审美偏好智能定位方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(10): 2642-2649.
- [3] Cyr D, Kindra G S, Dash S. Web site design, trust, satisfaction and e-loyalty: the Indian experience [J]. Online Information Review, 2008, 32(6): 773-790.
- [4] Rau P L P, Gao Q, Liu J. The effect of rich web portal design and floating animations on visual search [J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 2007, 22(3): 195-216.
- [5] Bauerly M, Liu Y L. Effects of symmetry and number of compositional elements on interface and design aesthetics [J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 2008, 24(3): 275-287.
- [6] Lai G Y, Chen P H, Shih S W, et al. Computational models and experimental investigations of effects of balance and symmetry on the aesthetics of text-overlaid images [J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2010, 68 (1/2): 41-56.
- [7] Cyr D, Head M, Larios H. Colour appeal in website design within and across cultures: a multi-method evaluation [J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2010, 68 (1-2): 1-21.
- [8] Schmidt K E, Liu Y L, Sridharan S. Webpage aesthetics, performance and usability: design variables and their effects [J]. Ergonomics, 2009, 52(6): 631-643.
- [9] 周蕾, 薛澄岐, 汤文成, 等. 界面元素布局设计的美度评价方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(05): 758-766.
- [10] 牛亚峰. 基于脑电技术的数字界面可用性评价方法研究 [D]. 基于脑电技术的数字界面可用性评价方法研究, 2019.