

中文引用格式:蒋琪轲,王炎鑫,李鹏程,等. 核电厂事故情境下操纵员任务处理复杂度评估[J]. 中国安全科学学报,2025,35(6): 128-133.

英文引用格式:JIANG Qike,WANG Yanxin,LI Pengcheng, et al. Assessment of operator task-handling complexity in nuclear power plant accident scenarios [J]. China Safety Science Journal,2025,35(6):128-133.

核电厂事故情境下操纵员任务处理复杂度评估*

蒋琪轲^{1,2}, 王炎鑫², 李鹏程^{**1,2}教授

(1 南华大学 资源环境与安全工程学院,湖南 衡阳 421001;

2 南华大学 人因研究所,湖南 衡阳 421001)

中图分类号:X945

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.1386

基金项目:国家自然科学基金资助(51674145);湖南省自然科学基金面上项目资助(2025JJ50418)。

【摘要】 为科学评估核电厂事故情境下操纵员任务处理的复杂度,提出一种基于信息熵与图像熵的核电厂操纵员任务处理复杂度(OTHC)评估模型;该模型从界面信息复杂度(IIC)、任务复杂度(TC)和规程复杂度(PC)3个维度出发,构建包含界面布局、图符、文字、色彩等8个复杂度指标的评估体系,通过熵值法客观赋权,基于模型实现复杂度的定量评估;为验证该模型的有效性,以一回路小破口事故诊断任务为例,提取相关的界面信息与操作流程,构建复杂度网络图并评估复杂度,结合美国国家航空航天局任务负荷指数(NASA-TLX)量表获取主观复杂度数据,分析模型评估结果与操纵员主观复杂度之间的关系。结果表明:一回路OTHC高于二回路;所构建模型评估的复杂度与主观复杂度间具有高度正相关性,能够有效反映实际任务处理复杂度水平。

【关键词】 核电厂; 事故情境; 操纵员; 任务复杂度(TC); 评估模型; 图像熵

Assessment of operator task-handling complexity in nuclear power plant accident scenarios

JIANG Qike^{1,2}, WANG Yanxin², LI Pengcheng^{1,2}

(1 School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China,

Hengyang Hunan 421001, China; 2 Human Factor Institute, University of South China,

Hengyang Hunan 421001, China)

Abstract: To rigorously assess the complexity of operator task execution under nuclear power plant accident scenarios, this study proposes an operator task-handling complexity (OTHC) evaluation model based on information entropy and image entropy. The model evaluates complexity from three dimensions: interface information complexity (IIC), task complexity (TC), and protocol complexity (PC). It establishes an evaluation system comprising eight complexity indicators, including interface layout, icons, text, and color. The entropy weighting method was employed to objectively assign weights, enabling quantitative evaluation of complexity using the model. To validate the model's effectiveness, a primary circuit small-break loss-of-coolant accident diagnosis task was used as a case study, for which a

* 文章编号:1003-3033(2025)06-0128-06; 收稿日期:2025-02-05; 修稿日期:2025-04-11

** 通信作者:李鹏程(1978—),男,湖南邵阳人,博士,教授,主要从事人因工程、核系统安全评价和核安全人因可靠性研究。E-mail: lipengcheng0615@163.com。

complexity network diagram is constructed, and the proposed model is applied to assess complexity. Subjective workload data are collected using the national aeronautics and space administration task load index (NASA-TLX) scale. The results show that the OTHC of the primary circuit is higher than that of the secondary circuit. The complexity assessed by the constructed model is highly positively correlated with subjective complexity, effectively reflecting the actual level of task processing complexity.

Keywords: nuclear power plants; accident scenarios; operators; task complexity (TC); assessment model; image entropy

0 引言

数字化核电厂先进的人机界面 (Human-Machine Interface, HMI) 和自动化系统,对操纵员任务处理能力提出更高的要求^[1]。复杂的界面设计和庞大的信息流,直接影响操纵员对异常状态的判断和应急响应效率^[2]。核电厂事故情景下,操纵员的任务处理水平是影响核安全的关键因素之一^[3]。因此,评估事故情境下操纵员任务处理过程中的复杂度,对于提高核电厂的整体安全水平具有重要的理论和实际意义。

当前,国内外关于复杂度的研究主要有主观评估和客观评估2种。在主观评估方面,HART等^[4]使用美国国家航空航天局任务负荷指数(National Aeronautics and Space Administration-Task Load Index, NASA-TLX)量表从6个方面评估,最终得到界面复杂度;在客观评估方面,CORCHS等^[5]提出基于视觉元素的复杂度分析,COMBER等^[6]通过拟合界面信息数量和信息出现概率定义界面信息复杂度(Interface Information Complexity, IIC)。JINKYUN等^[7]量化了核电厂紧急情景下的程序化任务的复杂度。唐文哲等^[8]验证了一种基于图像的快速计算HMI信息复杂度的有效性。尽管上述主客观评估方法在复杂度研究上各有优势,但仍存在一些局限性。主观评估过于依赖个体的主观判断,缺乏一致性与客观性,难以全面反映实际复杂度;客观评估虽具有较高的科学性和可重复性,但多数研究集中于单一维度,缺乏对任务复杂度(Task Complexity, TC)与规程复杂度(Protocol Complexity, PC)的综合评估。

为弥补上述不足,笔者拟提出一种基于信息熵和图像熵的操纵员任务处理复杂度(Operator Task-Handling Complexity, OTHC)评估模型,从IIC、TC和PC维度构建综合评估体系。通过熵值法计算指标权重,并通过实际事故案例进行验证,以期为核电厂高风险场景中的人机系统优化提供科学依据。

1 OTHC 指标

1.1 OTHC 度分析

基于现场调研与文献^[9],综合分析某核电厂操作环境、事故情境中的任务流程和人机交互行为,发现IIC、TC与PC对OTHC的影响较大。IIC直接影响操作界面的设计和用户体验,界面布局及元素的复杂性显著影响操纵员的感知负担和任务执行效率^[10-11]。界面布局复杂度(Interface Layout Complexity, ILC)直接决定视觉搜索时间和认知负荷,图符复杂度(Graphic Complexity, GC)会阻碍信息的快速理解^[12];文字复杂度(Text Complexity, TEC)影响阅读速度和理解程度,复杂的文字排版可能增加认知负荷;色彩复杂度(Color Complexity, CC)则影响注意力分配和信息区分,不合理的色彩配置可能导致视觉混淆,增加认知负荷^[13-14]。TC是OTHC的关键要素,数字化控制系统不仅要求操纵员执行传统的主任务(如监视系统、状态评估、响应计划和执行响应),还需频繁处理画面调整、界面导航等界面管理任务,多样且高频的任务显著增加了操纵员的认知负荷,直接影响其情景意识与操作绩效^[15]。PC对核电厂的安全稳定运行至关重要,操作规程的逻辑结构影响操纵员对系统状态的理解和预测能力,复杂的规程逻辑可能降低情境意识,增加操作失误的风险;规程步骤的复杂性则会提升认知负荷,增加出错概率,从而威胁系统安全^[16]。

1.2 OTHC 指标建立

排除操纵员个人差异(如经验、知识水平),从IIC、TC和PC共3个维度构建OTHC综合评估指标。IIC包含ILC和界面元素复杂度(Interface Element Complexity, IEC),后者进一步从图符、文字和色彩3个方面分析;TC包括主TC(Main TC, MTC)和界面管理TC(Interface Management TC, IMTC);PC细分为规程逻辑复杂度(Protocol Logic Complexity, PLC)和规程步骤复杂度(Protocol Step

Complexity, PSC), 建立的指标如图 1 所示。

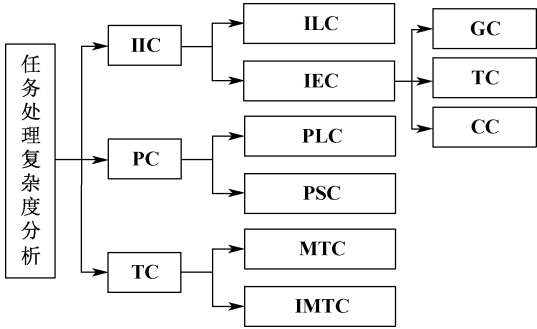


图 1 操纵员任务处理复杂度评估指标
Fig. 1 Operator task processing complexity evaluation metrics

2 任务处理复杂度评估模型

2.1 熵的基本理论

信息论中熵^[17]用于描述系统中信息的混乱程度或不确定性,代表系统状态所包含的平均信息量。熵的基本式为:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (1)$$

式中: $H(X)$ 为随机变量 X 的熵; $p(x_i)$ 为事件 x_i 的发生的概率; $\log_2 p(x_i)$ 为该事件 x_i 的自信息量。在图像熵的计算中,一阶熵表示操作的逻辑结构复杂度,二阶熵反映操作过程中的信息数量复杂度,二者共同构成信息复杂度的多维度描述体系。

2.2 OTHC 评估模型

1) 复杂度指标权重确定。邀请具有丰富专业知识和实际工作经验的专家评分,评分等级设定为 1—5 级。假设有 n 位专家对 m 个复杂度指标评分,原始评价指标矩阵为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1m} \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{im} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & & x_{nj} & & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 x_{ij} 为第 i 位专家对第 j 项复杂度指标的评分,其中, $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ 。

标准化指标 z_{ij} 为:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (3)$$

式中 z_{ij} 为标准化后的值。标准化矩阵 $Z = \{z_{ij}\}$ 。

第 j 项指标的熵值 e_j 为:

$$e_j = - \frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (4)$$

式中 p_{ij} 为指标概率, $p_{ij} = z_{ij} / \sum_{i=1}^n z_{ij}$ 。 e_j 越小,表明第 j 项指标的分散程度越大,包含的信息越多。

熵冗余度 g_j 为:

$$g_j = 1 - e_j \quad (5)$$

式中 g_j 为第 j 项指标的熵冗余度,熵冗余度越大,指标的重要性越高。第 j 项指标的权重 w_j :

$$w_j = g_j / \sum_{j=1}^m g_j \quad (6)$$

2) 复杂度评估模型。基于图像熵原理,通过界面信息分析和专家访谈,构建全面、准确的 HMI 信息结构图 (Information Structure Graph, ISG) 和动作控制图 (Action Control Graph, ACG), 计算第 j 项指标的一阶/二阶熵 h_j :

$$h_j = - \sum_{i=1}^j p(A_i) \log_2 p(A_i) \quad (7)$$

式中 A_i 为图中所识别的类别。

采用欧几里得范数对各个复杂度指标加权,得到 OTHC 的值 H 为:

$$H = \sqrt{w_1 h_1^2 + w_2 h_2^2 + \cdots + w_j h_j^2} \quad (8)$$

3 OTHC 评估模型实例分析

3.1 指标权重计算

邀请 20 位 2~5 年工作经验的核电厂主控室操纵员和 18 位 5 年以上的操纵员参与指标权重确定。在发放指标权重调查表前,向参与者详细介绍每个复杂度指标的定义、内涵以及在核电厂事故情境下的具体表现形式,并通过实际的核电厂 HMI 截图和操作案例说明。

指标权重调查表设计为李克特 5 级量表形式,从 1(非常重要)到 5(非常重要)评价每个复杂度指标在 OTHC 中的重要性。由式(2)一式(6)计算 8 个指标的权重,见表 1。

表 1 复杂度指标权重

Table 1 Complexity index weight

复杂度指标	权重 w_j
ILC	0.103 0
GC	0.133 3
TEC	0.128 7
CC	0.124 0
PLC	0.108 7
PSC	0.123 0
MTC	0.137 7
IMTC	0.141 9

3.2 复杂度网络图构建

以一回路小破口事故为例,分析安全注入系统(简称安注)触发后事故诊断任务。主任务 ISG 与界面管理任务 ISG 如图 2 和图 3 所示。

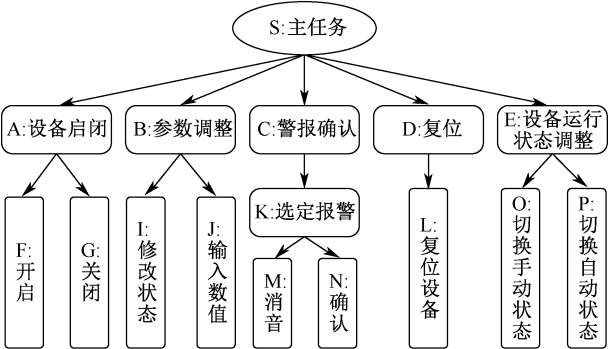


图 2 主任务 ISG
Fig. 2 ISG of main task operation

分析一回路安注事故诊断涉及的 5 个 HMI 界面元素,图符包含 3 类静态类型和 8 类动态类型(5 类可操作、3 类不可操作);色彩分为 8 种低频功能色与 2 种高频背景色;文字包含数字及英文(分大写和小写),均具有 2 种字号。基于此构建界面各元素的 ISG,依据核电厂应急运行规程构建一回路安注后事故诊断 ACG,如图 4 所示。

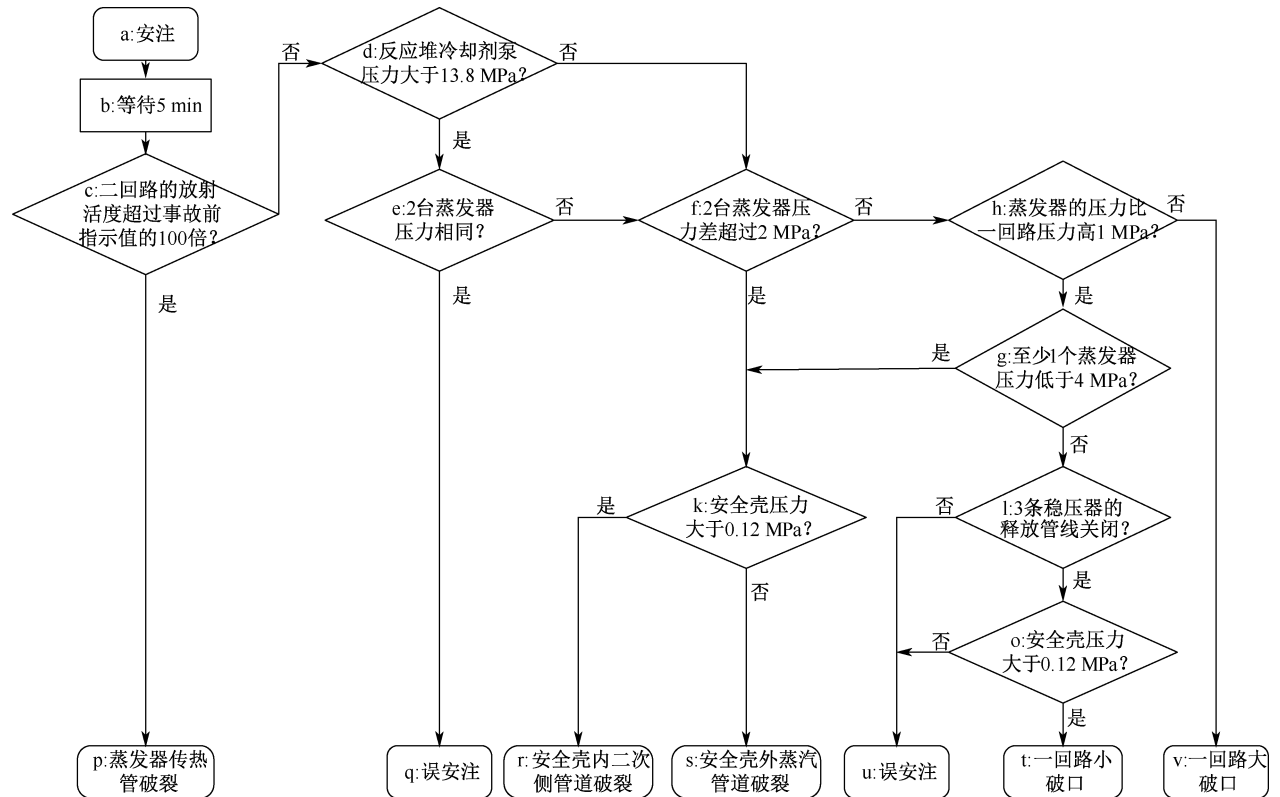


图 4 一回路安注后事故诊断 ACG
Fig. 4 ACG of diagnostic protocol for post-safety-injection accidents in primary circuit

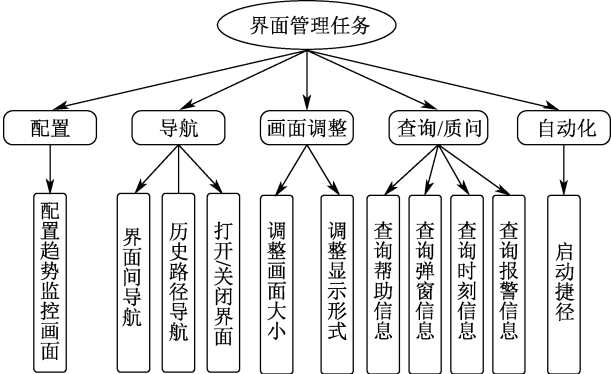


图 3 界面管理任务 ISG
Fig. 3 ISG of interface management task

3.3 复杂度计算

表 2 为结合图 2 建立的主任务 ISG 二阶熵识别类别。由表 2 和式(7)可求得 MTC 的 h_M 为 3.500, 一回路的 IMTC、GC、CC 和 TEC 分别为 3.212、2.680、1.701 和 2.913。

根据图 4 建立安注后事故诊断规程 ACG 一阶熵识别类别(表 3)与二阶熵识别类别(表 4)。由式(7)求得 PLC 和 PSC 分别为 2.106 和 4.059。

图像化一回路安注后事故诊断任务中的 5 个 HMI 界面,使用开源计算机视觉库加载这些图像并

表 2 主任务 ISG 二阶熵识别类别

Table 2 Second-order entropy identification category of main task operation ISG

节点	相邻节点	类别	节点	相邻节点	类别
S	A、B、C、D、E	1	F、G	A	7
A	F、G	2	I、J	B	8
B	I、J	3	K	C、L、M	9
C	K	4	L、M	K	10
D	N	5	N	D	11
E	O、P	6	O、P	E	12

表 3 事故诊断 ACG 一阶熵识别类别

Table 3 First-order entropy identification category of diagnostic protocol ACG

输入	输出	节点	类别
0	1	a	1
1	0	p、q、r、s、t、v	2
1	1	b	3
2	0	u	4
1	2	c、d、e、g、h、l、o	5
2	2	f、k	6

表 4 事故诊断 ACG 二阶熵识别类别

Table 4 Second-order entropy identification category of diagnostic protocol ACG

节点	相邻节点	类别	节点	相邻节点	类别
a	b	1	l	g、o、u	10
b	a、c	2	o	j、t、u	11
c	b、d、p	3	p	c	12
d	c、e、f	4	q	e	13
e	d、f、q	5	r、s	k	14
f	d、e、h、k	6	t	o	15
g	h、k、l	7	u	l、o	16
h	f、g、v	8	v	h	17
k	f、g、r、s	9	—	—	—

将其转换为灰度图像,统计所有像素的灰度值及每个灰度级别出现的频率,计算其在整个图像中的概率,最后基于信息熵原理由 Python 求图像熵。5 个界面的图像熵分别为 0.842 3、0.505 7、0.670 6、1.934 3 和 2.420 3,算术平均值 ILC 为 1.275。由式(8)求得一回路 OTHC 的值 H 为 2.870。同理,求得二回路操纵员任务处理的各指标复杂度值,见表 5。

3.4 OTHC 评估模型的验证

采用 NASA-TLX 量表^[18],以 OTHC 评估模型计算出的各指标的复杂度作为自变量、参与者在任务执行过程中感知的各指标主观复杂度评分作为因变量,从心理需求、身体需求、时间压力、任务绩效、努力程度和挫折感 6 个维度量化操纵员的工作负荷,评分范围为 1~10 分,分值越高表明相应维度的负荷越大。对 6 个维度的得分加权平均得到 NASA-

TLX 总分,表征各指标的主观复杂度。

表 5 一、二回路复杂度评估结果

Table 5 Primary/secondary circuit complexity assessment

复杂度指标	一回路	二回路
ILC	1.275	1.451
GC	2.680	2.922
TEC	2.913	2.913
CC	1.701	1.559
PLC	2.106	1.182
PSC	4.059	3.322
MTC	3.500	2.922
IMTC	3.212	3.212
OTHC	2.870	2.626

邀请 10 位具备核电厂模拟机操作经验的核科学技术专业的研究生参与,验证在简化版的 M310 压水堆核电厂模拟机平台上进行。培训合格后进入正式验证任务。验证任务设计包括视觉搜索任务和安注后事故诊断任务 2 部分,任务间隔 30 min。在视觉搜索任务中,要求操纵员在限定时间内迅速识别特定信息并记录,如查找某一关键阀门的当前状态或某一系统的异常参数。任务完成后,操纵者需立即填写 NASA-TLX 量表,以收集主观 IIC 的数据。事故诊断任务要求操纵员在安注启动后,依据核电厂事故操作规程,进行一回路操作,以确保压力和温度平稳下降。任务结束后,操纵者同样需填写 NASA-TLX 量表,以获取主观 PC 和主观 TC 的相关数据。

采用线性回归方法分析 OTHC 评估模型复杂度与操纵员主观评分间的关系,如图 5 所示。可以看出,OTHC 评估模型复杂度与主观复杂度间具有高度正相关性($R = 0.930, p < 0.001$),线性回归方程为 $y = 0.581\ 88 + 1.787\ 82x$,相关度 R^2 为 0.864。验证了 OTHC 评估模型的有效性和准确性。

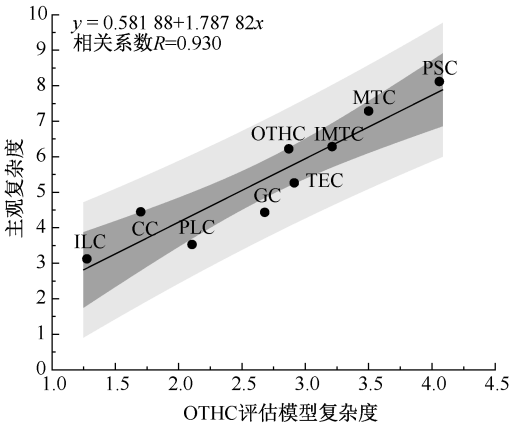


图 5 主观复杂度与 OTHC 评估模型复杂度回归分析
Fig. 5 Regression analysis of subjective complexity and OTHC evaluation model complexity

4 结 论

1) 一回路操纵员的任务处理复杂度(2.870)高于二回路(2.626),即在事故情境下一回路操纵员承担更大的认知负荷;规程步骤复杂度(4.059)与主任务复杂度(3.500)对整体复杂度贡献度最大,

是影响操纵员认知负荷的关键因素。

2) 验证结果表明:OTHC 评估模型的量化复杂度与操纵员基于 NASA-TLX 量表的主观复杂度评分间具有较高正相关性($R = 0.930, p < 0.001$),相关度 R^2 为 0.864,验证了 OTHC 评估模型的有效性。

参 考 文 献

- [1] LIU Peng, LI Zhizhong. Comparison between conventional and digital nuclear power plant main control rooms: a task complexity perspective, part I: overall results and analysis[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2016, 51: 2-9.
- [2] ZHANG Jingling, SU Daizhong, ZHUANG Yan, et al. Study on cognitive load of OM interface and eye movement experiment for nuclear power system[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2020, 52(1): 78-86.
- [3] 李鹏程, 许倩, 王烨. 核电厂运行阶段安全文化评价指标体系研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(2): 60-66.
LI Pengcheng, XU Qian, WANG Ye. Study on evaluation index system of safety culture in operation phase of nuclear power plant [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(2): 60-66.
- [4] HART S G, STAVELAND L E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): results of empirical and theoretical research[J]. Advances in Psychology, 1988, 52(6): 139-183.
- [5] CORCHS S E, CIOCCA G, BRICOLO E, et al. Predicting complexity perception of real world images[J]. PLoS One, 2016, 11(6): DOI:10.1371/journal.pone.0157986.
- [6] COMBER T, MALBY J R. Screen complexity and user design preferences in windows applications[J]. Harmony Through Working Together: Proceedings of OZCHI, 1994, 94: 133-137.
- [7] PARK J, JUNG W. A study on the development of a task complexity measure for emergency operating procedures of nuclear power plants[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(8): 1102-1116.
- [8] TANG Wenzhe, CHEN Shanguang, LIN Yun, et al. Image entropy-based interface evaluation method for nuclear power plants[J]. Entropy, 2023, 25(12): DOI:10.3390/e25121636.
- [9] YAN Shengyuan, TRAN C, CHEN Yun, et al. Effect of user interface layout on the operators' mental workload in emergency operating procedures in nuclear power plants[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 322: 266-276.
- [10] ALBAGHLI R, JANDALI Y, ALMAHMID S, et al. Leveraging initial cognitive load to predict user response to complex visual tasks[C]. Electrical Engineering and Computer Systems and Science (EECCSS). Avestia. 2022: DOI:10.11159/mhici22.103.
- [11] WARE C. Information visualization: perception for design[M]. Massachusetts: Morgan Kaufmann, 2019: 20-23.
- [12] 吴晓莉, 于士康, 刘志垚, 等. 核电厂监控显示界面数据图符信息突显研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(9): 29-36.
WU Xiaoli, YU Shikang, LIU Zhiyao, et al. Study on information highlighting of data graph in nuclear power plant monitoring display interface[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(9): 29-36.
- [13] YANG Ying, XU Zili. Analysis and application research of interface design elements for mobile platforms: modeling from the perspective of complexity[C]. 2022 International Conference on Sustainable Computing and Data Communication Systems (ICSCDS). IEEE, 2022: 1439-1442.
- [14] HEALEY C G. Choosing effective colours for data visualization[C]. Proceedings of Seventh Annual IEEE Visualization'96. IEEE, 1996: 263-270.
- [15] 蒋建军, 张力, 王以群, 等. 核电厂数字化人-机界面二类任务信息导航调度算法研究[J]. 核动力工程, 2018, 39(1): 140-145.
JIANG Jianjun, ZHANG Li, WANG Yiqun, et al. A scheduling algorithm for information navigation of secondary task of digital human-computer interface in a nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineering, 2018, 39(1): 140-145.
- [16] AHN J, LEE S J. Deep learning-based procedure compliance check system for nuclear power plant emergency operation[J]. Nuclear Engineering and Design, 2020, 370: DOI:10.1016/j.nucengdes.2020.110868.
- [17] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(1): 3-55.
- [18] PARK J, JUNG W. A study on the validity of a task complexity measure for emergency operating procedures of nuclear power plants: comparing with a subjective workload [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, 53(5): 2962-2970.

作者简介: 蒋琪轲 (2000—), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为人因工程、核安全与核应急管理。E-mail: jiangqike@foxmail.com。