

中文引用格式:李琦桢,吴晓莉,杨星灿,等. 核电显控系统故障告警跨屏交互的注意捕获效应研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(5): 178-185.

英文引用格式:LI Qi'an, WU Xiaoli, YANG Xingcan, et al. Visual attention capture effect in cross-screen interaction of fault alarms in nuclear power display and control system[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(5): 178-185.

# 核电显控系统故障告警跨屏交互的注意捕获效应研究\*

李琦桢<sup>1</sup>, 吴晓莉<sup>\*\*1</sup>教授, 杨星灿<sup>2</sup>工程师, 晏彪<sup>1</sup>

(1 南京理工大学 设计艺术与传媒学院, 江苏 南京 210094;

2 中广核工程有限公司 核电安全技术与装备全国重点实验室, 广东 深圳 518172)

中图分类号:X912.9

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.0826

基金项目:国家自然科学基金面上项目资助(52175469); 核电安全监控技术与装备国家重点实验室开放课题(K-A2021.419); 中广核智能核电战略专项(K-A2021.502.03); 江苏省自然科学基金面上项目资助(BK20221490)。

**【摘要】** 核电显控系统是典型的跨屏交互场景, 为准确迅速地监测和响应多源故障告警, 从跨屏交互和故障告警2个维度出发设计变量, 单一试次中设置随机组合的跨屏数量、跨屏方位与告警数量、告警级别、告警位置变量, 并通过眼动追踪技术和行为试验捕捉操纵员在不同交互条件下的视觉注意行为。结果表明: 显示跨屏数量的增加会负面影响注意捕获效应, 导致操纵员频繁转动视角来寻找目标刺激, 降低任务效率。随着告警数量的增加, 注视次数和注视持续时间出现下降趋势, 说明过多的告警信号可能导致信息过载, 并阻碍操纵员深入处理单个告警。高告警级别能够有效吸引注意力并促进快速响应。未来在跨屏行为场景中考虑用户注意力分布与任务效率, 通过优化监控屏幕布局与故障告警系统, 改进告警设计、减少视角转移需求, 能够提升告警察觉任务操作的安全可靠性。

**【关键词】** 核电显控系统; 故障告警; 跨屏交互; 注意捕获效应; 行为指标; 眼动指标

## Visual attention capture effect in cross-screen interaction of fault alarms in nuclear power display and control system

LI Qi'an<sup>1</sup>, WU Xiaoli<sup>1</sup>, YANG Xingcan<sup>2</sup>, YAN Biao<sup>1</sup>

(1 School of Design Art and Media, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing

Jiangsu 210094, China; 2 State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Technology and

Equipment, China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518172, China)

**Abstract:** The nuclear power display control system is a typical cross-screen interaction scenario in which the manipulator must accurately and rapidly monitor and respond to multiple sources of fault alarms, and the attentional capture effect plays a critical role. This study designed variables from the two dimensions of cross-screen interaction and fault alerts. In a single trial, variables such as the number of cross-screens, cross-screen orientation, the number of alerts, alert level, and alert location were set in

\* 文章编号:1003-3033(2025)05-0178-09; 收稿日期:2024-12-17; 修稿日期:2025-02-19

\*\* 通信作者:吴晓莉(1980—),女,新疆伊宁人,博士,教授,主要从事工业系统人因失误、人机交互与工效学方面的研究。E-mail:wuxlhu@163.com。

random combinations. Eye-tracking technology and behavioral experiments were conducted to capture operators' visual attention behavior under different interaction conditions. The research reveals that an increase in the number of cross-screen displays adversely affects the attention capture effect, causing operators to frequently shift their perspectives to locate target stimuli and reducing task efficiency. As the number of alerts increases, there is a declining trend in the number and duration of fixations, indicating that excessive alert signals may lead to information overload and hinder operators' in-depth processing of individual alerts. High-level alerts effectively capture attention and facilitate rapid responses. In the future, considering the distribution of users' attention and task efficiency in cross-screen behavior scenarios, by optimizing the layout of monitoring screens and the fault alert system, improving alert design, and reducing the need for perspective transfer, the safety and reliability of alert detection task operations can be enhanced.

**Keywords:** nuclear power display and control system; fault alarm; cross-screen interaction; attentional capture effect; behavioral indicators; eye movement metrics

0 引 言

在智能核电显控系统中,主控室中多个屏幕同时为操纵员呈现视觉信息。但操纵员的注意资源和视觉通道对信息的加工能力是有限的。跨屏交互过程中,信息量大、信息结构复杂的情境使得操纵员容易出错造成核电事故<sup>[1]</sup>。核电跨屏交互场景中信息呈现是否符合人的认知行为特征将大大影响操纵员信息获取、任务响应的效能,符合操纵员的视觉注意捕获机制的界面信息更容易被凸显。因此,深入研究跨屏交互下的注意捕获效应,指导跨屏场景的搭建、跨屏信息的组织与呈现,从而帮助操纵员在复杂多变的核电监控环境中实现高效、精准的注意力分配。

视野中部分具有奇异特征的刺激信息会不受当前任务目标或主观意图的影响,自动地吸引用户视觉注意的现象,称为视觉注意捕获<sup>[2]</sup>。除单纯的视觉刺激信息能够捕获视觉注意,这个过程中用户的目标和主观意图也会对视觉注意捕获产生影响<sup>[3]</sup>。相关学者尝试研究并合理利用注意捕获效应,以设计更优越的人机交互体验,提升复杂信息界面交互任务绩效。RUTHRUFF 等<sup>[4]</sup>证实了界面信息凸显显著捕获注意,静态颜色仅任务相关时吸引注意;STOLTE 等<sup>[5]</sup>发现异常闪烁频率引发注意捕获并伴随返回抑制;GOLDENHAUS-MANNING 等<sup>[6]</sup>指出注意力资源助益目标记忆,不区分内外特征;孟晓荣等<sup>[7]</sup>发现特定颜色与形状提升调度终端界面注意捕获,轨道图元编码优于传统编码,提高调度监控与应急作业效率。YAN Wen 等<sup>[8]</sup>从视觉注意力出发,研究图标大小与显示分辨率比值,通过眼球追踪、脑电信号及行为反应分析,得出不同显示设备上图标

呈现的最佳比例;GRESCH 等<sup>[9]</sup>运用眼动技术研究注意在屏幕间转换,发现域间转移成本高于域内,且难度不因时间增加而降低,结果表明:注意域间转换由独特功能调节。综上所述,合理运用和测量视觉注意捕获相关指标并据此进行设计是提高信息界面跨屏交互质量与认知绩效的有效手段。但现有研究特定场景跨屏交互这一特定复杂场景下,对注意捕获效应的综合研究仍显不足。

鉴于此,笔者将聚焦核电显控系统进行场景剖析并选取关键变量,通过眼动追踪技术和行为试验,精准捕捉操纵员在不同交互条件下的视觉注意行为,深入揭示核电跨屏交互中的注意捕获效应。以期为监控屏幕布局与故障告警系统优化提供全新视角与有力依据。

1 核电显控系统跨屏交互分析

新一代智能核电显控技术的实现在保障核电厂能够被更加精确自动化、高效安全控制运行的同时,系统中分散且繁多的信息来源使得操纵员感官,尤其是视觉信息通道,需要适应频繁的跨屏交互情境,接收监控并处理大规模信息。系统中巨量的信息呈现需求被分散到主控室操纵员工作站有限元分析工作站的多个显示屏幕(Visual Display Unit,VDU)、主控室前端大屏幕及纸质文档上。在操纵员执行任务过程中,最广泛的人机交互行为是发生在不同的VDU 中跨屏信息搜索活动,如图 1 所示。

这一过程中,操纵员极易受到跨屏交互的影响出现注意捕获干扰、感知决策效率低下、信息缺失疏漏、任务执行失败等问题。有限的记忆容量和信息加工能力驱使操纵员需要采用适当的策略分配注意

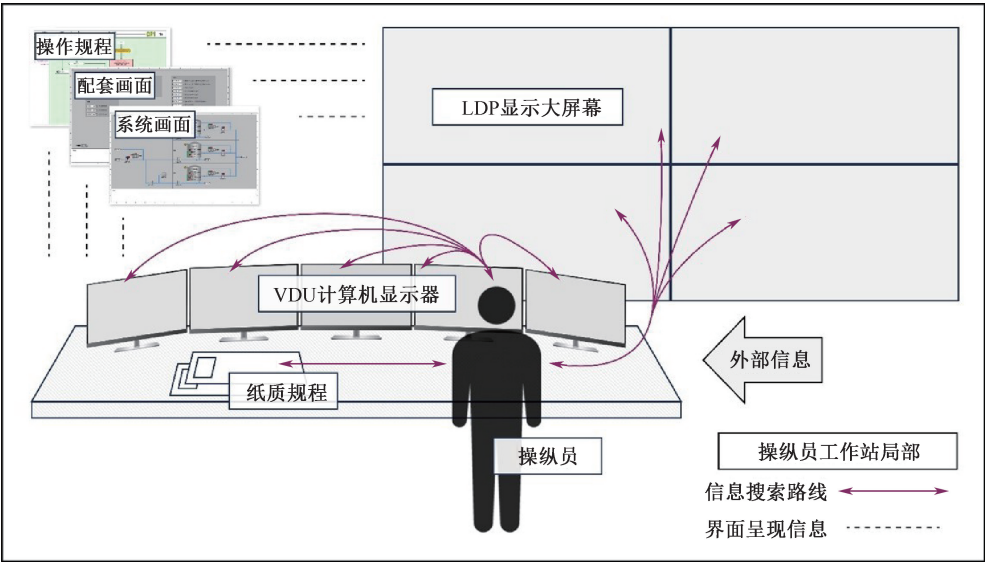


图 1 跨屏信息搜索活动

Fig. 1 Information search activity across screens

资源,才能应对跨屏交互情境带来的信息选择和管理难度。正常工况下,操纵员从 VDU 上被动接收故障告警信息的场景是典型的信息特征驱动的视觉监视行为<sup>[10]</sup>。操纵员在监视当前任务的画面信息时,告警信息可能会随机出现在任一屏幕中,此时操纵

员会出现关键的监视转移行为,这一场景会占据较多的注意资源,监视过程中更易受到如屏幕数量布置等外部因素、告警信息显示方式等交互因素及不同操纵员带来的个体因素的影响。故障告警跨屏搜索如图 2 所示。

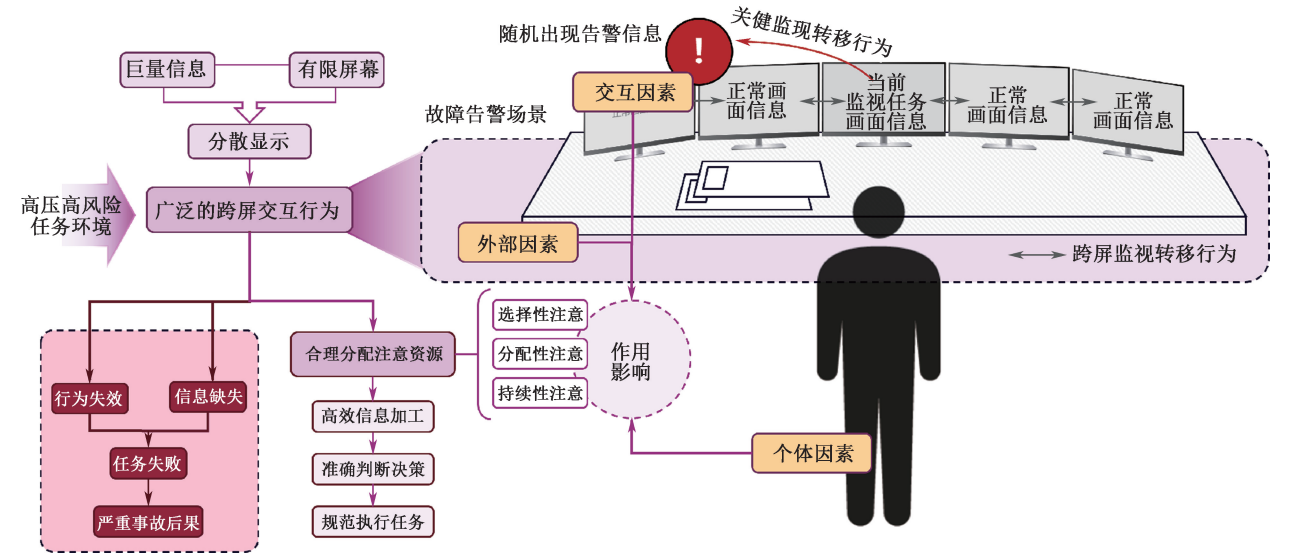


图 2 故障告警跨屏搜索

Fig. 2 Fault alarm cross-screen search

2 故障告警跨屏交互试验

采用注意捕获机制中的视觉搜索范式,设计在任务执行场景中插入一个或数个故障告警目标搜索任务,提取闪烁要素和跨屏行为 2 位维度的要素设计试验变量,开展心理学行为反应及眼动试验,收集

被试反应时、正确率及注意捕获相关的眼动指标,分析核电显控系统故障告警跨屏交互的视觉注意捕获效应。

2.1 故障告警跨屏交互试验材料

试验包含注视与搜索 2 种画面。为模拟核电显控系统场景,参考核电工艺流程,设计 12 张

1 920 px×1 080 px 的仿真搜索画面,视觉上接近监控界面但信息布局为模拟。所有画面信息密度统一,含 10 个设备图符、5 个数据图符和 2 个控件,如图 3 所示。每组试次随机选 5 张搜索画面,分布于 5 个屏幕。

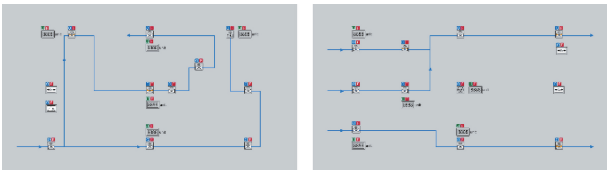


图 3 核电显控画面素材(部分)

Fig. 3 Materials for nuclear power display and control screen (partial)

2.2 故障告警跨屏交互试验变量

试验变量是从跨屏交互和故障告警 2 个关键维度来设计。

跨屏交互分为跨屏数量与跨屏方位(相对于屏幕外的位置)2 个子变量,试验涉及的屏幕布局和编号参照如图 4 所示。跨屏数量是指以 C 屏作为主任务屏幕的起点,B 屏和 D 屏被界定为相邻屏,A 屏和 E 屏被定义为相隔屏。如果故障告警在 C 屏显示,则称之为“跨 0 屏”;若在 B 或 D 屏显示,则为“跨 1 屏”;若在 A 或 E 屏显示,则为“跨 2 屏”。跨屏方位指以 C 屏作为主任务屏幕的起点,将告警显示位置归类:如果告警在 C 屏出现,则视为“中心屏”;若出现在 A 或 B 屏,则归为“左侧屏”;如果在 D 或 E 屏,则定义为“右侧屏”。

故障告警的维度被细分为 3 个关键子变量:告警数量、告警级别、告警在单一屏幕内的具体位置(简称告警位置)。试验呈现的故障告警形式是闪

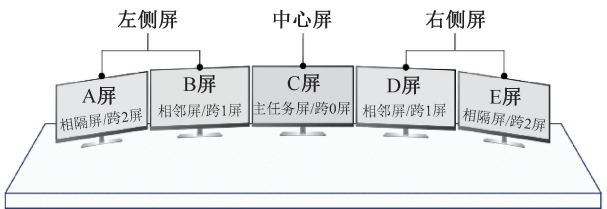


图 4 试验屏幕布局和编号参照

Fig. 4 Screen layout and reference numbering

烁,这种方式能有效传达紧迫性和潜在危险的感知信息,同时也是核电显控系统中应用最广泛的故障告警提示信号。告警数量指一个试次中所有屏合计出现的告警数量,范围是 1 ~ 3 个。依据 IEC 60073—2002<sup>[11]</sup>,通过故障告警闪烁频率定义告警。2 Hz 为快闪,故障告警级别高,0.5 Hz 为慢闪,故障告警级别低。告警位置(屏幕内)是以屏幕中心为参考点,按列和行划分出九宫格形式,共计 9 个位置。

2.3 故障告警跨屏交互试验指标选取

采用注意捕获机制中的视觉搜索范式,设计在任务执行场景中插入一个或数个故障告警目标搜索任务,提取闪烁要素和跨屏行为 2 维度的要素设计试验变量,开展心理学行为反应及眼动试验,收集被试反应时,正确率及注意捕获相关的眼动指标,分析核电显控系统故障告警跨屏交互的视觉注意捕获效应。研究指标选取见表 1。反应时(Reaction Time, RT)和正确率(Accuracy, ACC)是最经典的行为反应指标,反映出试验要素捕获了被试的视觉注意力。YAN Wen<sup>[8]</sup>、吴晓莉<sup>[12]</sup>等通过试验验证指示更短的 RT 和更高 ACC,均代表着出现更强的注意捕获效

表 1 试验指标描述

Table 1 Descriptions of experimental indicators

| 指标类型   | 指标名称   | 指标说明                | 注意捕获效应指标描述                 |
|--------|--------|---------------------|----------------------------|
| 行为反应指标 | RT     | 故障告警刺激出现到被试反应的用时    | 反应时越短,注意捕获效应越强             |
|        | ACC    | 故障告警视觉搜索任务的正确反应占比   | 正确率越高,注意捕获效应越强             |
| 眼动指标   | 注视持续时间 | 个体观察刺激时目标注视点的持续时长   | 特定区域注视时长与其他区域差异大,或存在注意捕获效应 |
|        | 注视次数   | 观察时眼睛停留位置数量         | 刺激相关区域注视点越多,注意捕获效应越强       |
|        | 平均瞳孔直径 | 特定时间或条件下测量得到的瞳孔大小均值 | 特定任务中直径明显增大,或发生注意捕获效应      |
|        | 眼跳次数   | 观察时注视点间快速移动次数       | 频繁眼跳且路径指向特定区域,或发生注意捕获效应    |
|        | 扫视路径   | 注视点连成的轨迹            | 分析路径可知视觉搜索顺序与注视点分布情况       |



应,被试将更多的注意力分配到这一任务中。选取的眼动指标参考郑新夷等<sup>[13]</sup>的研究,是常用于注意相关眼动试验中的成熟指标。

2.4 故障告警跨屏交互试验流程

被试需完成 24 次试验,每次会随机在任意屏幕上出现告警数量、告警级别、告警位置随机的故障告警。试验前,C 屏展示指导语,被试了解步骤后先练习再正式试验。正式试验开始时,C 屏上出现黑色“+”注视点并在 1 000 ms 后消失。C 屏有 5 个设备可手自动切换,被试需在 C 屏上找出并通过点击将设备切换至自动状态。试验过程中,任意屏幕上随机出现告警图符,被试需暂停 C 屏上的手自动切换任务,找到并点击所有屏幕上对应数量的告警图符。处理完告警后继续切换任务,完成后按空格键进入下一试次,试验流程如图 5 所示。试验后,被试将填写人口学信息问卷。

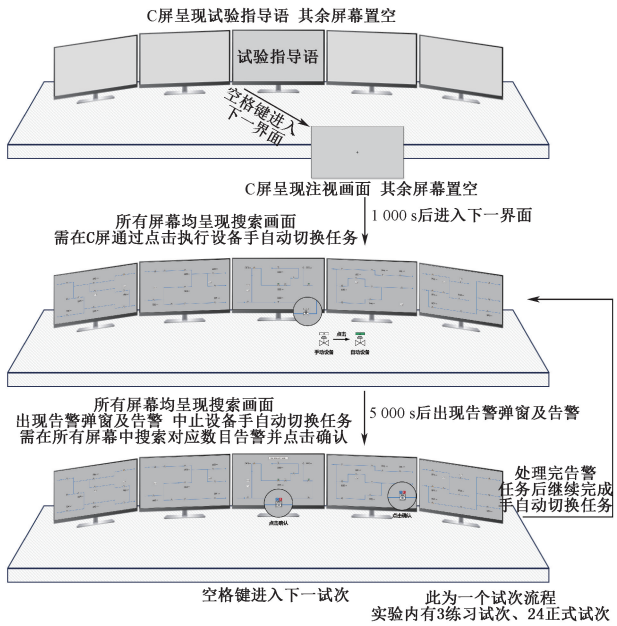


图 5 试验流程

Fig. 5 Experimental procedure

2.5 故障告警跨屏交互试验设备与被试

原型工具 Figma 是绘制试验素材、模拟真实动效呈现的试验交互平台。基于 Python 第三方库 pyautogui 和 pynput 开发的事件监听工具,用于记录鼠标和键盘点击事件的相关信息。采用无线眼球追踪设备 Tobii Glasses 2 捕获被试眼动数据。被试为中广核 12 名拥有核电主控室界面设计工作经验的人员。被试年龄在 29~44 周岁,平均年龄 35.75 周岁,无色盲、色弱等现象,矫正视力在 1.0 以上,工作年限在 4~18 年,平均工作年限为 7.5 年。试验设

备是 5 台规格一致且横向均匀分布的计算机,显示像素均为 2 880 px×1 800 px,分辨率颜色质量为 64 位,被试与屏幕中心的距离为 550~600 mm。

3 指标与注意捕获效应关联分析结果

3.1 行为指标数据

行为指标数据保留 12 组有效数据,采用标准分数(Z 分数)的方法筛选每个被试的数据,计算每个被试在所有试次中的平均行为指标值,并以此为基准,计算每个试次的标准分数,删除每个被试平均数上下 3 个标准差之外的试次,这些试次可能由于各种因素(如用户异常操作等)而导致异常值。经过这样的筛选,最终删除 0.5% 的数据,以确保后续数据分析的准确性和有效性。

为验证跨屏交互维度的指标,不考虑其他内容的差别,将数据导入到软件 SPSS 中,采用 2 因素多元方差检验。由各项显著性检验的显著性概率 Sig. 值可知:跨屏数量对 RT 的影响显著(假设检验中统计量对应的概率值  $p = 0.00 \leq 0.05$ )。跨屏方位对反应时的影响不显著( $p = 9.00 > 0.05$ ),各因素对 ACC 影响均不显著( $p > 0.05$ )。

为验证故障告警维度的指标,不考虑其他内容的差别,将数据导入到 SPSS 中,采用 2 因素多元方差检验。由各项显著性检验的 Sig. 值可知:告警级别对 RT 的影响显著( $p = 0.00 \leq 0.05$ )。告警数量、告警位置对 RT 的影响不显著(告警数量  $p = 3.20 > 0.05$ ;告警数量  $p = 0.27 > 0.05$ ),各因素对 ACC 影响均不显著( $p > 0.05$ )。

从行为指标数据来看,注意捕获效应强弱受到跨屏数量与告警级别的交互效应影响,体现在 RT 指标上。通过应用多重线性回归的方法,构建告警级别和跨屏数量对 RT 的多重线性回归模型具有统计学意义(统计量  $F = 76.498, p < 0.05$ )。行为指标多元线性回归系数见表 2。告警级别和跨屏数量的回归系数均具有统计显著性( $p < 0.05$ )。跨屏数量的系数为  $2.4851 \times 10^{-5}$ ,说明跨屏数量越多,RT 越长,更难出现注意捕获效应。告警级别为二分类变量,低级别被编码为 0,高级别被编码为 1,系数为  $-3.2762 \times 10^{-5}$ ,说明高告警级别对 RT 带来负向影响,注意捕获效应更显著。RT 与告警级别和跨屏数量影响因素之间的关系可用多元线性回归模型表示, $Q$  为跨屏数量, $L$  为告警级别,具体为:  $RT = 2.4581 \times 10^{-5}Q - 3.2762 \times 10^{-5}L + 1.2206 \times 10^{-4}$ 。

表 2 行为指标多元线性回归系数

Table 2 Multivariate linear regression coefficients for behavioral indicators

| 模型   | 未标准化系数                     |        | 标准化系数<br>Beta | 检验统计量 <i>t</i> | Sig.   |
|------|----------------------------|--------|---------------|----------------|--------|
|      | <i>B</i>                   | 标准误差   |               |                |        |
| 常量   | 1. 220 6×10 <sup>-4</sup>  | 0. 000 | —             | 21. 686        | 0. 000 |
| 告警级别 | -3. 276 2×10 <sup>-5</sup> | 0. 000 | -0. 230       | -6. 186        | 0. 000 |
| 跨屏数量 | 2. 485 1×10 <sup>-5</sup>  | 0. 000 | 0. 403        | 10. 813        | 0. 000 |

3.2 眼动指标数据

利用无线眼动追踪设备捕获 12 名被试在多种条件下的眼动轨迹。试验过程中记录注视次数、注视持续时间、眼跳次数、瞳孔直径和扫视路径等参数。所有眼动数据均被导入 Tobii Pro Lab 软件进行后期分析。由于部分被试的数据采样率不佳,最终剔除 3 名被试的数据以保证研究质量。将告警信号出现定义为每个试次的起始点,并以被试识别全部告警信号为结束点,在所有被试的记录中界定特定的时间兴趣区(Time of Interest, TOI)以便于深入分析。此外,被试数据还使用凝视过滤器算法去噪处理数据。

注视次数、注视持续时间、眼跳次数、瞳孔直径数据被导入到 SPSS 中进行处理,删除每个被试平均数上下 3 个标准差外的试次,共删除 0.5% 的数据,处理方法同行为指标数据。

为验证跨屏交互维度的指标,不考虑其他内容的差别,将数据导入到 SPSS 中,采用多因素多元方差检验。由各项显著性检验的 Sig. 值可知:跨屏数量对眼跳次数的影响显著( $p = 0.05 \leq 0.05$ ),对注视次数、注视持续时间、瞳孔直径数据的影响不显著(注视次数  $p = 0.25 > 0.05$ ; 平均瞳孔直径  $p = 2.39 > 0.05$ ; 注视持续时间  $p = 3.91 > 0.05$ )。跨屏方位对各眼动指标影响均不显著(眼跳次数  $p = 1.37 > 0.05$ ; 注视次数  $p = 1.56 > 0.05$ ; 平均瞳孔直径  $p = 8.90 > 0.05$ ; 注视持续时间  $p = 2.36 > 0.05$ )。

因眼动数据精确度有限,在故障告警维度指标的验证中去除告警位置,仅保留告警数量、告警级别 2 个对试验结果是否有显著性影响。将数据导入到 SPSS 中,采用多因素多元方差检验。由各项显著性检验的 Sig. 值可知:告警级别对眼跳次数、注视次数的影响显著(眼跳次数  $p = 0.00 \leq 0.05$ ; 注视次数  $p = 0.00 \leq 0.05$ ),对瞳孔直径数据、注视持续时间的影 响不显著(平均瞳孔直径  $p = 8.17 > 0.05$ ; 注视持续时间  $p = 5.61 > 0.05$ )。告警数量对注视次数、注视持续时间的影 响显著(注视次数  $p = 0.01 \leq 0.05$ ; 注视持续时间  $p = 0.00 \leq 0.05$ ),对

眼跳次数、平均瞳孔直径数据的影响不显著(眼跳次数  $p = 0.42 > 0.05$ ; 平均瞳孔直径  $p = 4.20 > 0.05$ )。从眼动指标数据来看,注意捕获效应受到跨屏数量与告警级别的交互效应影响,体现在眼跳次数这一眼动指标上。通过应用多重线性回归的方法,构建告警级别和跨屏数量对眼跳次数的多重线性回归模型具有统计学意义( $F = 13.702, p \leq 0.05$ )。眼动指标多元线性回归系数见表 3,告警级别和跨屏数量的回归系数均具有统计显著性( $p \leq 0.05$ )。跨屏数量的系数为 4.772,说明跨屏数量越多,眼跳次数越多,被试的注意力难以集中,不断从一次刺激转向另一个刺激,对某一固定的目标刺激产生注意捕获效应的难度变高。告警级别为二分类变量,低级别被编码为 0,高级别被编码为 1,系数为-5.558,说明高告警级别对眼跳次数带来负向影响,被试在该条件下将注意力高度集中在目标刺激上,具有更高的视觉搜索效率。眼跳次数与告警级别和跨屏数量影响因素之间的关系可用多元线性回归模型表示,设  $S$  为眼跳次数,  $RT = 2.458\ 1 \times 10^{-5} Q - 3.276\ 2 \times 10^{-5} L + 1.220\ 6 \times 10^{-4}$ 。

表 3 眼动指标多元线性回归系数

Table 3 Multivariate linear regression coefficients for eye-tracking indicators

| 模型   | 未标准化系数   |        | 标准化系数 Beta | <i>t</i> | Sig.   |
|------|----------|--------|------------|----------|--------|
|      | <i>B</i> | 标准误差   |            |          |        |
| 常量   | 9. 693   | 2. 027 | —          | 4. 783   | 0. 000 |
| 告警级别 | -5. 558  | 1. 781 | -0. 244    | -3. 120  | 0. 002 |
| 跨屏数量 | 4. 772   | 1. 184 | 0. 316     | 4. 030   | 0. 000 |

4 讨 论

以核电显控系统的跨屏交互故障告警察觉任务作为试验场景,获取行为指标和眼动指标数据,从跨屏交互维度和故障告警维度出发分析子因素对各项指标带来的影响及变化可知:跨屏交互维度的子因素跨屏数量、故障告警维度的告警级别、告警数量对相关指标具有显著性影响,跨屏方位、告警位置对相关指标无显著性影响。

跨屏数量对注意捕获效应带来负向影响,告警级别对注意捕获效应带来正向影响,他们之间的交互效应均用多元回归模型表示。高、低告警级别在各跨屏数量下 RT 及眼跳次数如图 6 所示。从图 6 可以看出,跨屏交互环境中 RT 和眼跳次数呈正相关增长,且此趋势与告警级别的优先级无关;高告警级别的 RT 更短,眼动次数更少。

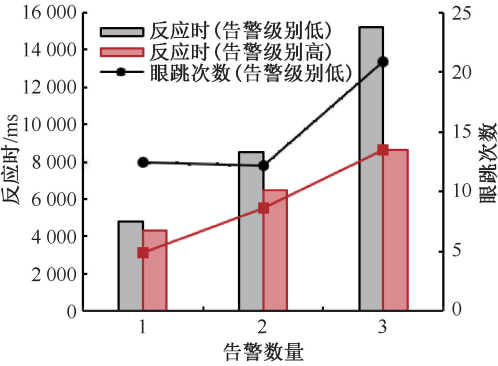


图 6 高、低告警级别在各跨屏数量下 RT 及眼跳次数  
Fig. 6 RT and saccades at high and low alarm levels across different numbers of screens

高频闪烁信号会给被试传达危险、不确定性、紧迫性的语义信号,能够有效吸引被试的注意力,从驱动被试在无意识状态下投入更多的注意资源完成快速反应的行为<sup>[14]</sup>。随着显示器数量的扩增至超出被试的视野范围,被试必须要通过转动身体及头部寻找目标刺激,这一行为导致注意捕获效应受到抑制,注意资源分配策略产生变化,从而降低任务效率,符合 MAJRASHI 等<sup>[15]</sup>对多个同类型设备跨屏交互会降低用户操作欲望、影响注意集中的观点。

告警数量对注意捕获的影响集中于注视相关的

指标上,各告警数量下的注视次数和注视持续时间如图 7 所示。注视次数和注视持续时间都随着告警数量的增加而减少,刺激越多,注意捕获效应会不断受限。多个告警导致被试注意力分散,在潜在的目标之间迅速转移视线,不深入处理单个告警。由于多目标之间的感知相似性,在觉察第一项告警后,被试无需投入过多注意资源即可快速找寻到其余告警,这与 GORBUNOVA<sup>[16]</sup>在单一屏幕内的试验结果相符,不会受到跨屏情境的影响。

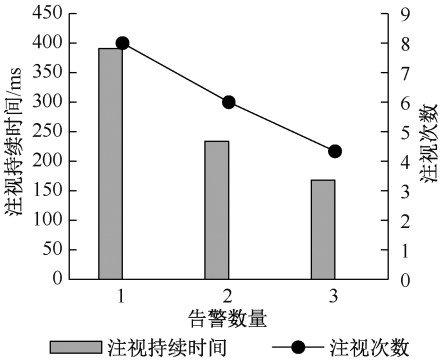


图 7 各告警数量下的注视次数和注视持续时间  
Fig. 7 Fixation number and duration at different alarm quantities

扫视路径展示了被试在故障告警觉察时获取目标刺激信息的行为特征。选取 1 名典型被试在不同告警数量下的扫视路径进行分析,如图 8 所示。

由图 8b 可知:视野屏内的告警信息会有更优越的注意捕获效应,继而产生屏内的注意转移。当告警信息不在视角内时,被试会主动转动视角进行视觉搜索,这与 LAVOIE 等<sup>[17]</sup>所指出的被试需要转移视角并注视初始视野之外的区域,导致对原始区域的注视行为占比降低相符。由图 8c 可知:跨屏交

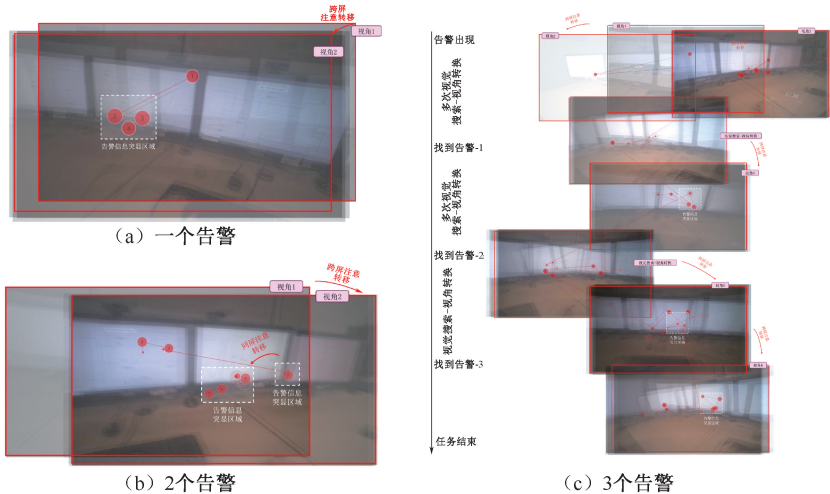


图 8 典型被试高告警级别下不同告警数量的扫视路径

Fig. 8 Scan path of typical subject under high alarm level with different alarm quantities



互任务的故障告警数量越多,跨屏数目越多,注视点越分散,扫视路径也会变得更加复杂。伴随着被试转动视角,会出现多次无效的信息搜索行为,影响告警信息觉察任务绩效。优化监控屏幕布局是在跨屏行为场景设计避免操纵员过多转移视角的有效方式。

## 5 结 论

1) 跨屏交互与故障告警的不同子因素显著影响注意力捕获,表现为反应时间延长、眼跳频次增加及注视相关指标变化。

2) 屏幕数量增多导致操作员需频繁调整身体与头部位置,降低注意力捕获效率,且超出直接视觉范围的屏幕数量,显著抑制任务性能。

3) 高级别告警通过高频闪烁有效吸引注意,促进快速响应。告警数量增加导致注视次数与持续时间减少,表明注意力分散于多个告警,降低单个告警的处理深度。

4) 未来在跨屏行为场景中优化监控屏幕布局与故障告警系统,考虑用户注意力分布与任务效率,通过改进告警设计、减少视角转移需求及认知负荷,提升告警察觉任务操作的安全性与可靠性。

## 参 考 文 献

- [1] 张力,戴立操,胡鸿,等. 数字化核电厂人因可靠性[M]. 北京:国防工业出版社,2019: 36-39.  
ZHANG Li, DAI Licao, HU Hong, et al. Human reliability of digitalized nuclear power plants[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019: 36-39.
- [2] POSNER M I, SNYDER C R R. Attention and cognitive control [M]. London: Routledge, 1975: 55-85.
- [3] SASIN E, MOREY C C, NIEUWENSTEIN M. Forget me if you can: attentional capture by to-be-remembered and to-be-forgotten visual stimuli[J]. Psychonomic Bulletin & Review, 2017, 24: 1 643-1 650.
- [4] RUTHRUFF E, FAULKS M, MAXWELL J W, et al. Attentional dwelling and capture by color singletons[J]. Attention, Perception, & Psychophysics, 2020, 82: 3 048-3 064.
- [5] STOLTE M, ANSORGE U. Automatic capture of attention by flicker[J]. Attention, Perception, & Psychophysics, 2021, 83(4): 1 407-1 415.
- [6] GOLDENHAUS-MANNING D T, COOPER N R, LOAIZA V M. Examining the role of attention during feature binding in visuospatial working memory[J]. Attention, Perception, & Psychophysics, 2024, 86(1): 354-365.
- [7] 孟晓荣,郑伟,黄康. 基于注意捕获的列车助调终端轨道图元编码优化研究[J]. 人类工效学, 2022, 28(5): 62-66.  
MENG Xiaorong, ZHENG Wei, HUANG Kang. Optimization of track element coding in train assistant dispatcher terminals based on attention capture[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2022, 28(5): 62-66.
- [8] YAN Wen, ZHANG Xuwei, DENG Li, et al. Research on the generality of icon sizes based on visual attention[J]. Engineering Reports, 2023, 5(3): DOI: 10.1002/eng2.12577.
- [9] GRESCH D, BOETTCHER S E P, VAN EDE F, et al. Shifting attention between perception and working memory[J]. Cognition, 2024, 245: DOI: 10.1016/j.cognition.2024.105731.
- [10] 胡鸿,张力,蒋建军,等. 核电厂数字化人-机界面监视转移路径预测方法及其应用[J]. 核动力工程, 2014, 35(3): 105-110.  
HU Hong, ZHANG Li, JIANG Jianjun, et al. Visual monitoring path forecasting method for digital human-computer interface in nuclear power plant and its application[J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(3): 105-110.
- [11] IEC 60073-2002, Basic an principles for man-machine interface, marking and identification. coding principles for indicators and actuators[S].
- [12] 吴晓莉,薛澄岐,GEDEON T,等. 数字化监控任务界面中信息特征的视觉搜索实验[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2018, 48(5): 807-814.  
WU Xiaoli, XUE Chengqi, GEDEON T, et al. Visual search on information features on digital task monitoring interface [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2018, 48(5): 807-814.
- [13] 郑新夷,康良凯,苏应站,等. 注意偏侧化对驾驶视觉搜索的眼动表现证据[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(增1): 207-211.  
ZHENG Xinyi, KANG Liangkai, SU Yinghong, et al. Evidence of eye movement performance in visual search for driving with attentional bias [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(S1): 207-211.
- [14] TURNER S, WYLDE J, LANGHAM M, et al. Determining optimum flash patterns for emergency service vehicles: an experimental investigation using high definition film[J]. Applied Ergonomics, 2014, 45(5): 1 313-1 319.
- [15] MAJRASHI K, HAMILTON M, UITDENBOGERD A L, et al. Cross-device user interactive behavioural patterns[C]. CHI 2021 Workshop on User Experience for Multi-Device Ecosystems: Challenges and Opportunities, 2021: 1-5.
- [16] GORBUNOVA E S. Perceptual similarity in visual search for multiple targets[J]. Acta Psychologica, 2017, 173: 46-54.
- [17] LAVOIE E B, VALEVICIUS A M, BOSER Q A, et al. Using synchronized eye and motion tracking to determine high-precision eye-movement patterns during object-interaction tasks[J]. Journal of Vision, 2018, 18(6): DOI: 10.1167/18.6.18.