

# 基于视觉生理反应指标的工业系统人机界面出错因子提取研究

吴晓莉<sup>1,2,3</sup>, 唐开元<sup>2,3</sup>, 晏彪<sup>2,3</sup>

1. 南京理工大学, 南京 210094; 2. 河海大学, 常州 213022; 3. 河海大学人因与信息系统交互实验室, 常州 213022

**摘要:** 为了降低用户在操作数字化仪控系统交互界面的认知负荷, 降低用户在操作数字化仪控系统交互过程中的出错率, 进行眼动追踪实验。实验以核电厂监控任务界面为样本, 运用凝视与扫视生理反应指标, 对数字化仪控系统交互界面的信息特征布局进行探究。基于对实验数据的结果分析得出, 用户在数字化仪控系统交互界面视觉认知过程中, 会产生信息疏漏、误读/误判等出错因子, 并通过提取用户在操作过程中产生的出错因子, 为数字化仪控界面的设计提供参考依据。基于设计认知过程中出错因子的交互界面设计对减少任务的出错率和提升交互界面的认知绩效具有一定的参考价值。

**关键词:** 出错因子; 信息特征; 眼动追踪; 凝视/扫视

中图分类号: J524

文献标识码: A

文章编号: 2096-6946(2020)05-0017-07

DOI: 10.19798/j.cnki.2096-6946.2020.05.003

## Error Factor Extraction of Industrial System Man-machine Interface Based on Visual Physiological Response Index

WU Xiaoli<sup>1,2,3</sup>, TANG Kaiyuan<sup>2,3</sup>, YAN Biao<sup>2,3</sup>

1. Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China; 2. Hohai University, Changzhou 213022, China;

3. Lab of Human Factors and Information System Interaction & Design, Hohai University, Changzhou 213022, China

**Abstract:** The work aims to conduct the eye tracking experiment, so as to reduce the user's cognitive load during the operation of interactive interface of digital instrumentation control system, and reduce the user's error rate during the interactive operation of the digital instrumentation control system. The experiment uses the monitoring task interface of a nuclear power plant as a sample, and adopts the physiological response indexes of gaze and saccade to explore the information feature layout of the interactive interface of a digital instrumentation control system. Based on the analysis of the experimental data, error factors such as information omission, misreading/misjudgment occur in the visual cognition process of the interactive interface of the digital instrumentation control system. By extracting the error factors generated by the user in the operation process, a reference is provided for the design of the digital instrumentation control interface. The interactive interface design based on the error factors in the design cognitive process has certain reference value for reducing the error rate of tasks and improving the cognitive performance of the interface.

**Key words:** error factor; information characteristics; eye tracking; gaze/saccade

人类从外界得到的信息量80%来源于视觉, 视觉是用户和界面交互的直接途径, 因此视觉认知(眼动追

踪)生理评估方法是非常有效的界面优劣评判方法。国内外学者对视觉认知方面的研究较为丰富, Sweller<sup>[1]</sup>

收稿日期: 2020-08-09

基金项目: 江苏省哲学社会科学重点资助项目(2017ZDIXM023); 江苏省社会科学基金(20YSB013); 江苏省自然科学面上项目(BK20181159); 江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2019647); 国家自然科学基金青年基金资助项目(71601068)

作者简介: 吴晓莉(1980—), 女, 新疆人, 博士, 南京理工大学教授, 主要研究方向为人因与信息系统交互。

(1998年)提出认知负荷下的资源有限理论,认为人的认知资源是有限的。李乐山<sup>[2]</sup>(2004年)从四个方面对视觉注意进行了研究。汪海波等<sup>[3]</sup>(2013年)从认知负荷方面对数字界面展开了研究,并提出了减少认知负荷的界面设计策略。韦海峰等<sup>[4]</sup>(2014年)的研究表明,视觉对刺激信息的形状特征、动作特征及颜色特征的加工过程是平行进行的,可以通过颜色编码使同一维度甚至不同维度之间的编码建立联系。李晶<sup>[5]</sup>(2015年)提出在认知资源的分配过程中可能会出现认知负荷过载或不足的情况。对于人机界面中人因出错的研究,国内外很多专家学者分别从不同的角度进行了分析。Nielsen<sup>[6]</sup>(1994年)与Shryane等<sup>[7]</sup>(1998年)提出了通过减少出错率进而改善界面的可用性的方法。Maxion<sup>[8]</sup>(2005年)研究了通过减少出错来提高视觉信息界面可靠性的方法。Krokos<sup>[9]</sup>(2007年)提出了视觉信息界面认知的出错分类方法。黄曙东等<sup>[10]</sup>(2003年)运用THERP人因失误评价方法对核电厂事故前的人因可靠性进行了研究。杨大新<sup>[11]</sup>(2011年)以认知心理学的理论阐述了人的信息处理机制,分析了数字化人机界面对人因失误的影响,并将其应用于界面的优化。以视觉认知为依托的眼动追踪实验已被国内外学者广泛应用于视觉信息界面的研究。石金富等<sup>[12]</sup>(2008年)通过眼动追踪实验探讨了网页布局对视觉搜索的影响。刘青等<sup>[13]</sup>(2010年)以认知学为理论基础,采用眼动追踪实验,结合定量实验方法,对轻轨的新旧界面进行了评估。胡凤培等<sup>[14]</sup>(2010年)采用眼动追踪实验,对视觉界面布局中项目位置信息提示展开了研究。李晓英<sup>[15]</sup>(2018年)构建了基于眼动追踪技术和可用性问题的评估模型,并将其用于某医院自助挂号机交互界面的改进。本文以视觉认知理论为基础,通过眼动追踪实验对数字化仪控界面出错因子展开提取。

### 一、复杂监控界面中的出错因子

复杂监控界面中的出错因子具有以下定义:操作人员在执行任务的过程中由于界面信息呈现的不合理而导致认知过程出现偏差,产生认知行为上的失误,即错误的选择判断或行为的忽略。本文研究视觉认知下的信息界面出错因子,吴晓莉<sup>[16]</sup>(2017年)将视觉认知界面产生的出错因子分为五类,即错误感知、知觉混淆、注意失效、记忆失误和疏忽。本文涉及到的出错类型为错误感知,故对错误感知认知分层模型进行具体分析。

错误感知的认知分层模型共有五种:语义模糊、视觉局限、视错、视觉迟钝和时间压力,对应解释如下:(1)语义模糊,即不能理解或错误理解;(2)视觉局限,即看不清、视野障碍或不在视野范围内;(3)视错,即不正确的知觉或视错觉;(4)视觉迟钝,即无刺激、刺激不明显或来不及反应;(5)时间压力,即短时间内做出错误行动。

### 二、运用生理指标提取出错因子

数字化仪控系统交互界面呈现的信息量大,信息关系复杂,操作者会进入复杂性认知。这种状态下可能会由于操作失误、误读/误判、反馈不及时等认知困难导致任务失败,严重时会产生系统故障,甚至重大事故。对眼动追踪生理指标的分析,有助于研究视觉认知过程中的搜索效率,提取出错因子。凝视与扫视是视觉认知加工的重要指标,可以通过眼动追踪测量凝视时间和扫视路径来分析信息搜索、认读、辨识过程中的视觉认知效率(Goldberg和Kotval<sup>[17]</sup>,1999年)。本次实验将以上生理指标运用到数字化仪控系统交互界面的视觉认知过程,通过眼动追踪生理指标数据的分析,找出界面在视觉认知过程中由于自身设计不合理导致的出错因子,为后续数字化仪控系统交互界面的修改提供基础。

### 三、实验

#### (一) 实验假设

本实验的目的是采用眼动追踪实验对主电路概述界面中的信息块进行测试,通过对被试凝视点、扫视点、凝视时间、扫视时间等眼动数据进行测定,运用眼动设备自带软件及SPSS软件对实验数据进行分析,研究不同任务之间眼动指标中的差异,分析出核电厂主电路概述界面认知绩效高的信息块样式及布局,并从中找出认知过程中的出错因子。本实验提出假设:(1)认读信息特征相似的图标会产生信息疏漏、误读/误判等出错因子;(2)横向式数字信息块的认知绩效优于纵向式数字信息块;(3)数字信息块和泵呈上下式排布时认知绩效优于左右式和上中下式;(4)按规律分布的图标认知绩效优于未按规律分布的图标。

#### (二) 实验设计

主电路概述界面是某核电厂的主监控界面,该界面的信息呈现多以数字信息块和图标为主,具有输出数值,显示运行状态的特点。由于主电路概述界面数

表1 任务类型

任务一：数字信息块形态		任务二：数字信息块和泵布局方式			任务三：子系统位置
横向式	纵向式	上下式	上中下式	左右式	
两个搜索任务： 横向式数字信息块、 纵向式数字信息块		三个搜索任务： 上下式排布、上中下式排布、 左右式排布			两个搜索任务： 位置一-RCP、 位置二-EAS

表2 凝视总时间方差分析

ANOVA 方差分析(因变量:凝视时间)						
		平方和	df	均方	F	显著性
任务一时间	组间	668000.667	1	668000.667	15.479	0.017
	组内	172616.667	4	43154.167		
	总计	840617.333	5			
任务二时间	组间	1021908.333	2	510954.167	14.484	0.029
	组内	105829.000	3	35276.333		
	总计	1127737.333	5			

字信息块和图标数量过多,且并没有按照统一的规律进行摆放,所以此实验将对具有代表性的数字信息块和图标进行提取,作为信息特征元素,进行认知绩效的验证,提取出错因子和查找认知绩效高的布局方式。实验根据信息特征元素的不同分为三个任务,见表1。

(三) 实验设备和程序

该实验程序以数字信息块形态特性(两组)、数字信息块和泵排布方式特性(三组)、子系统图标位置特性(两组)作为变量因素,设计三个任务,其中前两组特性设计实验材料分别为六个,第三组特性设计实验材料为一个。将实验材料导入眼动追踪设备 Tobii X120 Studio 系统,设定任务目标及任务完成操作方式。该实验在河海大学人机交互实验室进行,选取十位工科大学生作为被试,被试无色盲色弱,且视力或矫正视力正常,眼动追踪记录被试每个任务材料的搜索时间以及相关眼动生理指标。

四、实验结果

(一) 凝视时间——认知处理信息的时间

凝视时间为认知处理信息的时间,对不同的任务的凝视时间进行主效应方差分析,得到方差分析表,见表2。

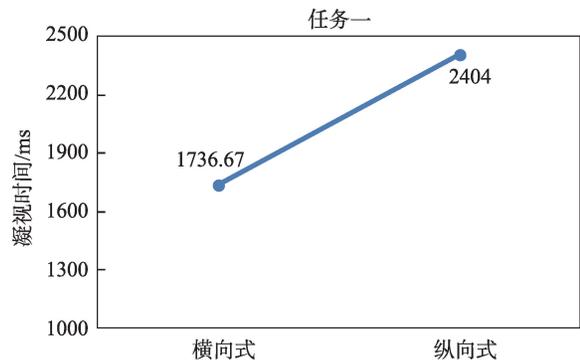


图1 任务一凝视时间对比

任务一对其凝视时间的方差分析表明,数字信息块形态特性主效应显著( $F=15.479, P=0.017, p<0.05$ ),见图1。横向式的数字信息块在认知的过程中凝视时间小于纵向式,实验结果符合视觉习惯(先横向观看再纵向观看)的规律。

任务二目标搜索的总注视时间的方差分析表明,数字信息块和泵排布方式主效应显著( $F=14.484, P=0.029, p<0.05$ ),见图2。上中下式和左右式排布方式的凝视总时间规律不明显,但都高于上下式排布方式,由此可得,数字信息块和泵的上中下式和左右式排布方式认知绩效无明显差异,上下式排布方式认知绩效则明显优于其他两种。

对任务三目标搜索的平均凝视总时间进行分析,

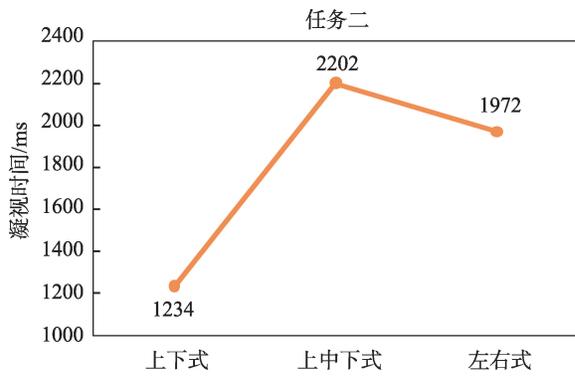


图2 任务二凝视时间对比

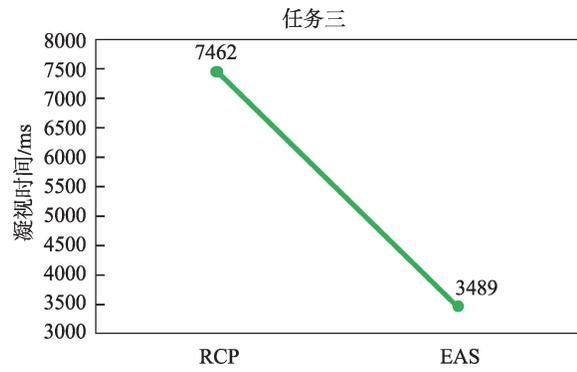


图3 任务三凝视时间对比

表3 凝视扫视次数分析

	任务一		任务二			任务三	
	横向式	纵向式	上下式	上中下式	左右式	位置一	位置二
平均凝视次数/次	11.7	15.7	8.5	12	12.5	49	22
平均扫视次数/次	35	43	28.5	35	35	143	73

表4 凝视次数方差分析

ANOVA 方差分析(因变量:凝视次数)						
		平方和	df	均方	F	显著性
任务一凝视次数	组间	28.167	1	28.167	16.900	0.015
	组内	6.667	4	1.667		
	总计	34.833	5			
任务二凝视次数	组间	19.000	2	9.500	28.500	0.011
	组内	1.000	3	0.333		
	总计	20.000	5			

位置一RCP所用平均总时间为7462 ms,位置二EAS所用平均总时间为3489 ms。究其原因由于子系统图标大都分布在灰色信息块内,只有RCP子系统图标未处于灰色信息块内,因此被试在寻找位置一处的RCP图标时需要耗费更多的任务时间,容易产生信息疏漏出错因子。任务三凝视时间对比见图3。

(二) 凝视—扫视——搜索信息的过程

在执行相同任务的不同界面中,凝视次数越多代表被试搜索的效率越低,界面的认知负荷越大。扫视次数越多代表被试寻找目标越困难,目标越不容易被发现,被试的认知负荷越大。对三个任务的平均凝视点和扫视点进行统计分析,分析结果见表3。任务一横向式的平均凝视次数为11.7次,平均扫视次数为35次,纵向式的平均凝视次数为15.7次,平均扫视次数为43次;任务二上下式排布的平均凝视次数为8.5次,平均扫视次数为28.5次,上中下式排布的平均凝视次数为12次,平均扫视次数为35次,左右式排布的平均凝视次数为12.5次,平均扫视次数为35次;任务三位置

一的平均凝视次数为49次,平均扫视次数为143次,位置二的平均凝视次数为22次,平均扫视次数为73次。

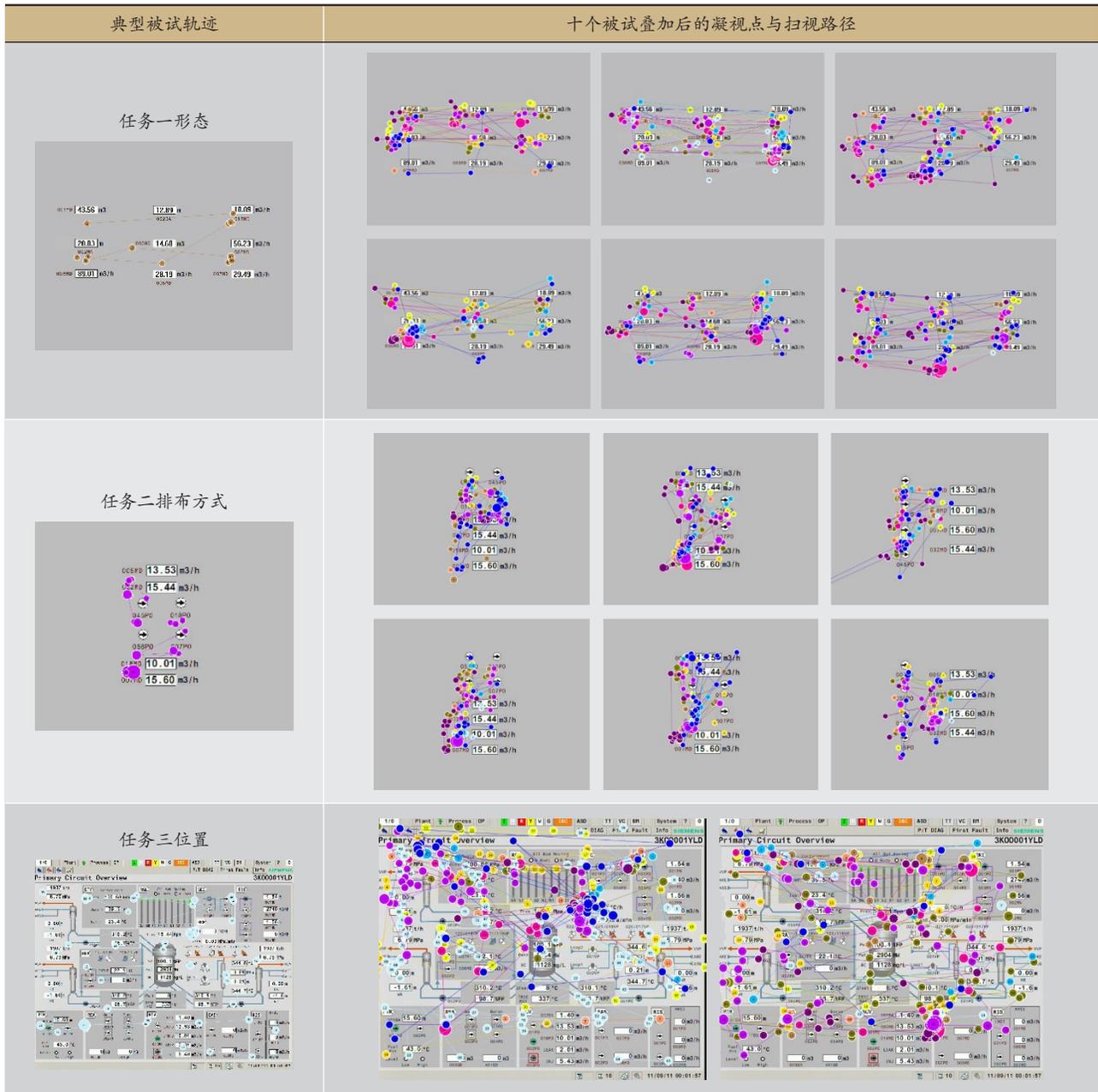
对不同任务的凝视扫视次数进行主效应分析,分别得到方差分析见表4和表5。由表可知,数字信息块形态对视觉搜索目标的凝视次数和扫视次数均有显著性影响(凝视次数 $F=5.798, P=0.027, p<0.05$ ,扫视次数 $F=5.008, P=0.038, p<0.05$ );数字信息块和泵排布方式对视觉搜索目标的凝视次数和扫视次数均有显著性影响(凝视次数 $F=4.776, P=0.017, p<0.05$ ,扫视次数 $F=5.171, P=0.013, p<0.05$ )。

根据主体间效应检验结果,可进一步对凝视扫视路径进行分析。根据所有搜索过程凝视点的x,y坐标,绘制出十个被试的叠加凝视扫视路径,见表6。由表6可知,各个任务的凝视扫视路径均有显著性差异。任务一中横向式的凝视点扫视点均低于纵向式,说明横向式数字信息块比纵向式数字信息块易于辨认,实验结果符合视觉从左至右的观看规律。任务二中上中下式排布的凝视点扫视点均低于上中下式排布和

表5 凝视次数方差分析

ANOVA 方差分析(因变量:凝视次数)						
		平方和	df	均方	F	显著性
任务一扫视次数	组间	96.000	1	96.000	10.667	0.031
	组内	36.000	4	9.000		
	总计	132.000	5			
任务二扫视次数	组间	56.333	2	28.167	9.941	0.047
	组内	8.500	3	2.833		
	总计	64.833	5			

表6 凝视次数及扫视路径比较



左右式排布,说明数字信息块和泵的上下式排布易于辨认,搜索认知绩效高。被试在左右式和上中下式排布的目标寻找中,凝视扫视路线近似于“II”;在上下式

排布的目标寻找中,凝视扫视路线近似于“F”,任务执行过程中后者的扫视路径符合人眼视觉规律。任务三中被试寻找RCP的凝视点扫视点多于EAS,扫视路径

也更加复杂,搜索目标用时更长。对子系统图标的位置位置进行分析,主电路概述界面中的子系统大都按规律分布在上部和下部的灰色信息块内,但是RCP并未遵循此规律,导致被试在对其目标搜寻中易产生信息疏漏,需要视线经过反复地寻找才能完成目标搜寻。在寻找RCP图标的过程中,多个被试还对数字信息块进行了浏览,其原因为数字信息块的形状、大小、颜色与子系统图标相似。当界面呈现的信息量大、信息关系复杂时,被试的认知负荷会大大增加,从而导致误读/误判。

通过对被试完成核电站主电路概述界面中的子系统图标及特定数字信息块的视觉搜索实验,以及对眼动指标和用户行为反应数据的分析,提取出信息遗漏、误读/误判出错因子。

## 五、结语

在核电站主电路概述界面的任务认知过程中,凝视和扫视指标可以作为眼动实验认知过程中的灵敏指标,通过这两个指标的相关性分析,可以对认知任务进行数据验证。通过任务实验数据表明,横向式数字信息块的认知绩效高于纵向式数字信息块;上下式的认知绩效高于左右式和上中下式;处于信息块内规律排布的子系统图标的认知绩效明显高于未处于信息块内规律排布的子系统图标,被试在搜寻非规律排布的子系统图标时会产生信息疏漏和误读/误判出错因子。核电站等大型工厂的人机交互界面往往使操作员在执行任务的过程中产生认知负荷。通过此次实验,可以将眼动追踪实验及其凝视和扫视指标应用于界面改进,找出认知过程中的出错因子,从而提升界面的认知绩效。

## 参考文献

[1] SWELLER J, VAN MERRIËNBOER J J G, PAAS F. Cognitive Architecture and Instructional Design[J]. Educational Psychology Review, 1998, 10(3): 251-296.

[2] 李乐山. 人机界面设计[M]. 北京:科学出版社, 2004.

LI Leshan. Man Machine Interface Design[M]. Beijing: Science Press, 2004.

[3] 汪海波, 薛澄岐, 黄剑伟, 等. 基于认知负荷的人机交互数字界面设计和评价[J]. 电子机械工程, 2013, 29(5): 57-60.

WANG Haibo, XUE Chengqi, HUANG Jianwei, et al. Design and Evaluation of Human-Computer Digital Interface Based on Cognitive Load[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2013, 29(5): 57-60.

[4] 韦海峰. 数字化人机界面操纵员监视过程中目标识别失误和信息搜集失误实验验证研究[D]. 衡阳:南华大学, 2014.

WEI Haifeng. Experimental Verification Research on Target Identification Errors and Information Collecting Errors of Operator During Monitoring on Digitalized Human-Interface[D]. Hengyang: University of South China, 2014.

[5] 李晶. 均衡认知负荷的人机界面信息编码方法[D]. 南京:东南大学, 2015.

LI Jing. Information Encoding Method of Human-Computer Interface for Equilibrium of Cognitive Load [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.

[6] NIELSEN J, MACK R L. Usability Inspection Methods [M]. New York: Wiley, 1994.

[7] SHRYANE N M, WESTERMAN S J, CRAWSHAW C M, et al. Task Analysis for the Investigation of Human Error in Safety Critical Software Design: A Convergent Methods Approach [J]. Ergonomics, 1998, 41(11): 1719-1736.

[8] MAXION R A, Reeder R W. Improving User-Interface Dependability through Mitigation of Human Error[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2005, 63(1): 25-50.

[9] KROKOS K J, BAKER D P. Preface to the Special Section on Classifying and Understanding Human Error [J]. Human Factors the Journal of the Human Factors & Ergonomics Society, 2007, 49(2): 175-176.

[10] 黄曙东, 戴立操, 张力. 核电站事故前人因可靠性分析方法[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(2): 50-54.

HUANG Shudong, DAI Licao, ZHANG Li. Pre-Initiators HRA Method in a Nuclear Power Plant[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(2): 50-54.

[11] 杨大新. 核电站主控室数字化人机界面中信息显示对人因失误的影响及信息布局的实验优化[D]. 衡阳:南华大学, 2011.

YANG Daxin. The Effects of Information Display on Human Error and Optimization of Information Layout Based on Experiment in Digital Human-Machine Interface of Main Control Room of Nuclear Power Plant[D]. Hengyang: University of South China, 2011.

[12] 石金富, 曹晓华, 王钢, 等. 网页布局对视觉搜索影响的

- 眼动研究[J]. 人类工效学, 2008, 14(4): 1-3.
- SHI Jinfu, CAO Xiaohua, WANG Gang, et al. An Eye Movement Study on Visual Search of Web Page Layout [J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2008, 14(4): 1-3.
- [13] 刘青, 薛澄岐, HOEHN F, 等. 基于眼动追踪技术的界面可用性评估[J]. 东南大学学报, 2010(2): 331-334.
- LIU Qing, XUE Chengqi, HOEHN F, et al. Interface Usability Evaluation Based on Eye-Tracking Technology [J]. Journal of Southeast University, 2010, 2: 331-334.
- [14] 胡凤培, 蔡雷厉, 柴黎林, 等. 页面布局中项目位置信息提示的视觉搜索策略研究[J]. 心理科学, 2010, 33(6): 1512-1515.
- HU Fengpei, CAI Leili, CHAI Lilin, et al. A Visual Searching Strategy Study of Item Position Information in Page Layout[J]. Psychological Science, 2010, 33(6): 1512-1515.
- [15] 李晓英, 周大涛, 黄楚, 等. 基于眼动追踪的自助挂号机界面可用性设计研究[J]. 机械设计与制造, 2018(8): 145-148.
- LI Xiaoying, ZHOU Datao, HUANG Chu, et al. Interface Usability Design of Self-service Registration Device Based on Eye Tracking[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(8): 145-148.
- [16] 吴晓莉. 复杂信息任务界面的出错—认知机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- WU Xiaoli. Error-Cognition Mechanism of Task Interface in Complex Information System[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [17] GOLDBERG J H, KOTVAL X P. Computer Interface Evaluation Using Eye Movements: Methods and Constructs[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1999, 24(6): 631-645.