

注意力分配策略对界面任务绩效和视觉行为的影响机制^①



王傲然, 吕 健, 刘 翔

(贵州大学 现代制造技术教育部重点实验室, 贵阳 550025)

通信作者: 吕 健, E-mail: jlv@gzu.edu.cn

摘 要: 在工程领域, 作业人员通常需要面对刺激分布不均的复杂信息界面, 并执行相关的交互任务. 作业人员的视觉注意力分配已被证明与任务绩效密切相关, 但对于复杂界面中基于不同信息分配策略的多优先级刺激对作业人员的视觉注意力分配及任务绩效间的潜在联系仍亟待研究. 对此, 本文基于多优先级注意力分配策略实验对作业人员在不同负荷条件下的任务绩效和视觉行为的影响机制展开研究. 实验结果表明, 差异性的分配策略和信息优先级划分提升了任务绩效表现, 不同分配策略和优先级划分条件下的视觉行为存在显著差异, 并受脑力负荷的影响. 该结论能够为人机交互界面的设计和优化提供参考, 从而提高作业人员在任务中的绩效表现.

关键词: 人机交互; 视觉注意力分配; 信息优先级; 任务绩效; 眼动追踪

引用格式: 王傲然, 吕健, 刘翔. 注意力分配策略对界面任务绩效和视觉行为的影响机制. 计算机系统应用, 2022, 31(11): 10-20. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8786.html>

Effect Mechanism of Attention Allocation Strategy on Task Performance and Visual Behavior of Interface

WANG Ao-Ran, LYU Jian, LIU Xiang

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology of the Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In the engineering field, operators need to face complex information interfaces with unevenly distributed stimuli and perform related interactive tasks. Visual attention allocation of operators has been proved to be closely related to task performance. However, the potential connection between visual attention allocation by multi-priority stimuli based on different information allocation strategies and task performance in complex interfaces requires further investigation. In this study, task performance and visual behavior of operators under different load conditions are studied on the basis of the experiment of the multi-priority attention allocation strategy. The experimental results indicate that the differential allocation strategy and information priority division improve the task performance, and the visual behavior differs significantly under different allocation strategies and priorities and is affected by mental loads. This conclusion can provide a reference for the design and optimization of human-computer interfaces and thus improve the task performance of operators.

Key words: human-computer interaction; visual attention allocation; information priority; task performance; eye tracking

在建筑、工程和施工行业, 受益于数字技术的广泛运用, 作业人员在—项工程中扮演的角色正在由具

体工作的执行者向管理者、监视者转变. 对于数据驱动的智能系统, 作业人员需要通过—定的界面在有限

^① 基金项目: 国家自然科学基金 (52065010); 贵州省科技计划 (黔科合基础-ZK[2021]—般 341, 筑科合同 [2021]7-3, 黔科合支撑 [2021]—般 397)

收稿时间: 2022-03-06; 修改时间: 2022-04-02; 采用时间: 2022-04-11; csa 在线出版时间: 2022-07-14

时间内处理大量的复杂信息。在这一背景下,人机交互界面作为作业人员与现实世界的媒介,其中视觉信息的呈现方式与个人的任务绩效息息相关。以工程监控为例,作业人员通常需要同时监视多组信息,并对其中不同优先级的异常进行响应。Endsley^[1]提出的“情境意识”概念解释了作业人员的一种意识水平,即在特定的情境中对相关要素做出反应并预测随后可能发生的状态。先前的任务驱动的视觉注意模型如, Peters 等人^[2]将任务相关的影响引入视觉注意的计算模型, Ehinger 等人^[3]基于情境语义对作业人员的视觉注意进行预测,而其中较少涉及基于优先级的注意力分配策略对作业人员的影响。冯传宴等人^[4]在高、低脑力负荷水平下开展了不同注意力分配策略对情境意识影响的工效学实验,结果表明注意力分配策略对任务绩效和情境意识均具有显著影响。大量研究表明,在信息加工过程中,人能够分配给并行信息的注意力资源是有限的。理想的交互界面需要充分利用注意力分配的规律对信息呈现方式进行控制,在提高作业人员的任务绩效方面起到促进作用。因此,如何根据交互任务的内容协调显示界面的辅助信息呈现方式,合理引导作业人员分配注意力,提高任务绩效,对该领域的交互界面设计具有参考意义。

1 视觉注意力分配研究

在工程领域,人的行为研究被广泛应用于交互系统的设计、分析及评价。在任务情境中,作业人员被训练针对固定目标执行任务,这一过程是长期持续的,并且任务绩效水平可能对其获得的报酬有所影响。Awh 等人^[5]在研究中提出了与传统二分法不同的注意控制结构,由当前目标、选择历史和物理显著性组成。其中,选择历史包括启动效应和与奖励相关的注意倾向。根据 Maljkovic 等人^[6]的研究,个体当前试次的注意选择会偏向于近期重复被选择过的刺激,即启动效应是反映个体先前注意选择经历对注意偏向的影响。Anderson 等人^[7]提出了价值驱动的注意控制理论,表明通过预先的训练过程可能使参与者形成对奖励条件的无意识反应。上述研究表明,经过一定量的训练或一定时间的经验积累,作业人员可以对任务情境中的各种异常自上而下地差异分配注意力并最终对决策结果形成具有显著倾向的影响。

注意力的分配已被证明是在任务情境中影响作业

人员绩效的重要因素之一,一些职业(如飞行员、驾驶员、监控人员等)要求作业人员在执行任务时保持较高的注意水平以应对可能的异常事件,因此需要对任务中作业人员的注意力分配进行量化研究。Wickens 等人^[8,9]提出了一种用于任务执行监督控制和可视化支持的 SEEV 模型,依据信息凸显性(salience)、努力(effort)、期望(expectancy)和价值(value)4个因素来引导视觉工作空间内的注意力行为,适用于复杂工作场所的监控任务中。Koch 等人^[10]提出的注意力控制模型解释了视觉信息经过分解-集成信息特征图谱在人脑神经系统中形成“凸显性地图”的过程,以及注意力和视觉场景间的相互作用。界面中的信息凸显性受到多种特征因素影响,包括信息的大小、色彩、形状、所在界面方位及态势等。同时,该理论中的期望和价值因素也阐明了视觉信息在人脑的集成环节的所受到的自上而下的注意力偏向和训练影响。

基于视觉注意力机制的复杂任务交互界面优化方法仍有进一步研究的空间。根据先前的研究结论,对注意力分配的调节可以通过自下而上和自上而下两条通路进行。本文基于上述研究和注意力理论设计了眼动追踪下的多优先级刺激任务,通过调整界面区域的刺激分配策略和具体刺激的凸显性特征对信息优先级进行划分,尝试研究负荷条件下多优先级刺激对作业人员的注意力分配及任务绩效的影响。

2 多优先级注意力分配策略实验

2.1 被试

本研究的实验参与者为16名机械工程专业在校大学生,其中男性10名,女性6名,年龄在21到26岁之间(平均值 $M = 23.125$,标准差 $SD = 1.409$),身体状况健康,右利手,视力或矫正视力在1.0以上,无色盲色弱。在实验进行前,所有被试均被告知实验的内容及具体流程并签署书面知情同意书。

2.2 实验设计

拟通过刺激响应实验验证视觉注意力分配策略和响应优先级划分在任务中的效度。由于工程监控界面大量多组信息具有复杂性,即不同兴趣区域(area of interest, AOI)内的事件具有不同的出现概率,且根据紧急程度的不同对事件信息要求的响应优先级不同。根据研究需要,在 Eyeso Studio (Version: 3.0.6325) 内设计响应实验。实验场景如图1。

实验界面被划分为 32 (8 列×4 行) 个区域, 并设计每两列为一个 AOI (图 2)。在不同的刺激分配策略下, 各 AOI 的刺激呈现频率不同。



图 1 实验场景

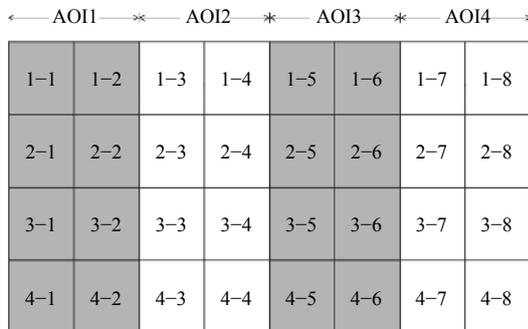


图 2 屏幕区域划分

被试将在高低脑力负荷条件下分别进行 3×2 的实验, 其中因素 1 为注意力分配策略, 包含 3 个水平: 平均分配、主次分配和多级分配; 因素 2 为响应优先级, 包含两个水平: 有响应优先级划分和无响应优先级划分。

在划分响应优先级的实验中, 综合考虑颜色本身对人的视觉机能结构和心理倾向影响, 设计具有相同明度和饱和度的红、黄、绿色的刺激分别对应高、中、低 3 个优先级; 在无响应优先级划分的实验中, 所有刺激均呈现为灰色。上述实验因素设计均基于 SEEV 模型, 其中因素 1 体现为刺激信息的“期望”, 即具有更高刺激信息出现频率的 AOI 可能吸引作业人员的更多注意力; 因素 2 则是刺激信息“价值”的凸显性表达, 即在刺激要素存在优先级划分的情况下, 具有更高优先级的信息可能吸引作业人员的更多注意力。实验中的脑力负荷包含两个水平: 高脑力负荷和低脑力负荷, 通过设置固定时间内不同的刺激信息量对负荷水平进行控制。表 1 和表 2 显示了高低脑力负荷下各分配策略对应的刺激呈现频率。

表 1 低脑力负荷水平下各 AOI 的刺激分配策略 (次/min)

分配策略	AOI1	AOI2	AOI3	AOI4
平均分布	10	10	10	10
主次分配	5	15	5	5
多级分配	15	5	10	20

表 2 高脑力负荷水平下各 AOI 的刺激分配策略 (次/min)

分配策略	AOI1	AOI2	AOI3	AOI4
平均分布	20	20	20	20
主次分配	10	30	10	10
多级分配	30	10	20	40

为了尽可能地降低疲劳效应对被试的影响, 各组实验的顺序通过拉丁方设计随机呈现。高低负荷的先后次序由被试自由选择, 一种负荷条件下的 6 组实验结束后, 被试有 5 min 的休息时间。每组实验的响应任务持续一分钟, 要求被试对界面内出现的刺激尽可能地做出反应, 并使用鼠标左键点击相应区域。若被试未能在一定时间内点击刺激区域, 刺激信息将会消失并计为响应无效。在正式实验开始前被试有充分的时间进行练习以熟悉实验操作。实验过程中, 被试可以随意转动头部, 但需要保持身体稳定。

3 实验分析

3.1 眼动指标测量结果

基于眼动行为的生理实验被用于各种人机界面的评价研究, 常用的眼动指标包括注视、扫视、眼跳、眨眼、瞳孔直径等。在任务情境中, 作业人员通常需要面对复杂信息界面, 经由视觉通道进行复杂的眼动行为, 对界面信息做出响应。注视点作为观察过程中知觉性选择的表征, 能够较好地表示其注意力分布情况。注视-扫视被认为反映了视觉搜索的认知加工过程^[11-13]。其中, 注视行为代表处理信息的认知过程, 而扫视则代表搜索信息的过程。刺激承载的信息越多, 双眼在其上停留的时间就越长。因此, 通过对注视-扫视的分析在一定程度上能够判断注意力分配策略是否能够对作业人员起到有利影响。另外, 相关研究表明^[14-16], 扫视速度能够反映大脑在任务过程中付出的努力, 认知负荷越高, 扫视速度越快。较快的扫视速度往往代表着较高的任务复杂性和负荷压力。在注视过程中, 瞳孔直径的变化通常被认为与目标信息的兴趣和脑力负荷有关。Wickens 等人^[17]在研究中指出, 在执行与认知有关的任务时, 作业人员需要对信息进行加工处理, 导致脑力

负荷增大,从而引起瞳孔直径的增加。瞳孔直径的减小则与人眼的疲劳有关。根据 Kahneman 等人^[18-20]的研究,人在充分休息后,瞳孔直径最大,在实验过程中,由于眼部疲劳程度加深,瞳孔直径会逐渐缩小。

根据本文的实验设计,基于注视点分布和凝视-扫视的眼动反应机制,分析不同的分配策略及优先级划分对被试的眼动行为的影响,并根据扫视速度和瞳孔直径指标分析被试在不同实验条件下的负荷情况。

3.1.1 平均注视持续时间和注视点分布

在 SPSS Statistics 19 中分别分析不同实验因素对被试在单个刺激材料上的平均注视持续时间的的影响,表 3 显示了各条件因素下被试平均注视持续时间的均值和标准差。

表 3 平均注视持续时间的均值和标准差 (ms)

指标	脑力负荷		注意力分配策略		响应优先级划分		
	低	高	多级	平均	主次	无	有
均值	227.594	226.045	228.968	190.224	268.325	207.391	245.276
标准差	134.408	98.792	97.510	124.736	106.424	120.461	102.691

单因素方差分析表明,注意力分配策略的 3 个水平对被试的平均注视持续时间的的影响具有显著差异 ($F = 132.069, P = 0.000, P < 0.01$)。最小显著性差异 (least significant difference, LSD) 方法的事后多重比较检验 (表 4) 发现,对于平均注视持续时间指标,3 种分配策略间存在显著差异,从平均分配、多级分配到主次分配依次增加。

采用独立样本 t 检验判断响应优先级划分对平均注视持续时间的的影响,详见表 5。结果显示,无响应优先级划分条件下的被试平均注视持续时间与有响应优先级划分条件下的被试平均注视持续时间在 0.01 显著性水平下呈现差异,比较均值发现在划分响应优先级的条件下,被试的平均注视持续时间更长。

表 4 注意力分配策略的平均注视持续时间 LSD 事后多重比较检验

分配策略	I	J	均值差值(I-J)	标准误差	显著性	95% 置信区间	
						下限	上限
多级分配		平均分配	38.744	4.310	0.000	30.295	47.194
		主次分配	-39.357	4.595	0.000	-48.367	-30.348
平均分配		多级分配	-38.744	4.310	0.000	-47.194	-30.295
		主次分配	-78.101	4.816	0.000	-87.544	-68.659
主次分配		多级分配	39.357	4.595	0.000	30.348	48.367
		平均分配	78.101	4.816	0.000	68.659	87.544

表 5 响应优先级划分的平均注视持续时间独立样本 t 检验

响应优先级划分	均值 (ms)	T	显著性
无	207.391	-10.080	0.000
有	245.276		

根据实验数据在 Matlab 中生成被试的注视点分布图,对不同实验条件组合下的被试注意力分布情况进行直观比较。表 6,表 7 分别显示了典型被试在高低脑力负荷条件下的注视点分布。

可以看出,高负荷条件下被试在界面内的注视点更多,分布更广;不同的注意力分配策略间,注视点的分布特征在各 AOI 内差异明显,而在响应优先级的两水平间,注视点的分布差异主要体现在 AOI 内的聚集程度,在划分响应优先级条件下,被试的注视点分布在单个刺激显示区域内相对密集。

3.1.2 注视-扫视比

Goldberg 等人^[21]提出了基于注视持续时间和扫视时间比率的视觉搜索效率计算方法,能够评估界面内信息分布是否有利于作业人员获取可用信息,公式如下:

$$R = \frac{f}{s}$$

其中, f 为注视持续时间,即人进行认知处理的时间; s 为扫视时间,即人用于搜索信息的时间; R 为任务搜索效率。当 $R > 1$ 时,认知处理时间大于信息搜索时间,说明刺激分布合理,有利于信息搜索;当 $R < 1$ 时,信息搜索时间大于认知处理时间,说明刺激分布不合理,不利于信息搜索。比较各条件因素下被试的注视-扫视比,如表 8 所示。

对于注意力分配策略,被试的注视-扫视比从多级分配、主次分配到平均分配依次递减,其中多级分配和主次分配策略的 $R > 1$,搜索效率较好,平均分配策略的 $R < 1$,搜索效率较差;划分响应优先级时,被试的注视-扫视比 $R > 1$,搜索效率较好,不划分响应优先级时,被试的注视-扫视比 $R < 1$,搜索效率较差。

3.1.3 扫视速度

表 9 显示了被试在各条件因素下平均扫视速度的均值和标准差。

单因素方差分析表明,注意力分配策略的 3 个水平对被试的平均扫视速度的影响具有显著差异 ($F = 32.790, P = 0.000, P < 0.01$)。事后比较发现 (表 10),对于平均扫视速度,3 种分配策略间存在显著差异,从多级分配、平均分配到主次分配呈依次递减趋势。

表 6 低脑力负荷条件下的典型被试的注视点分布

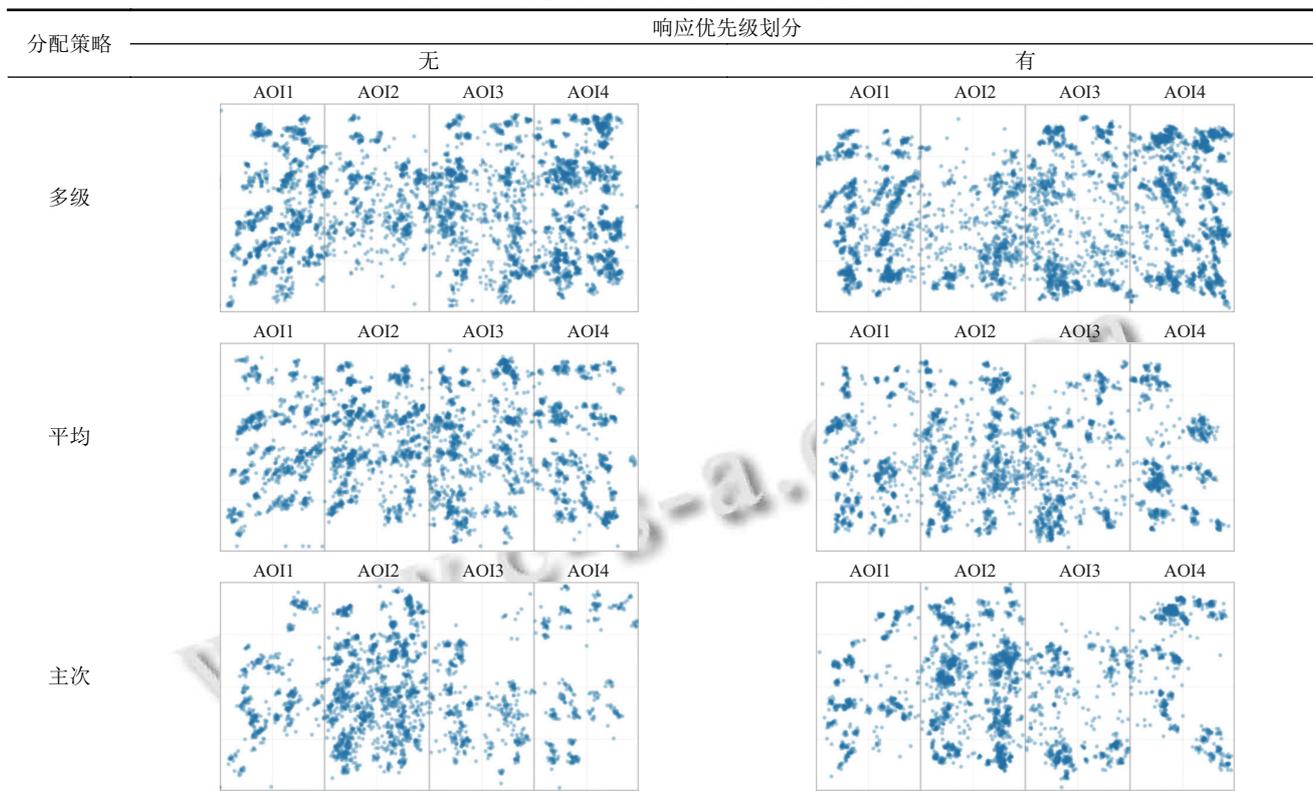


表 7 高脑力负荷条件下的典型被试的注视点分布

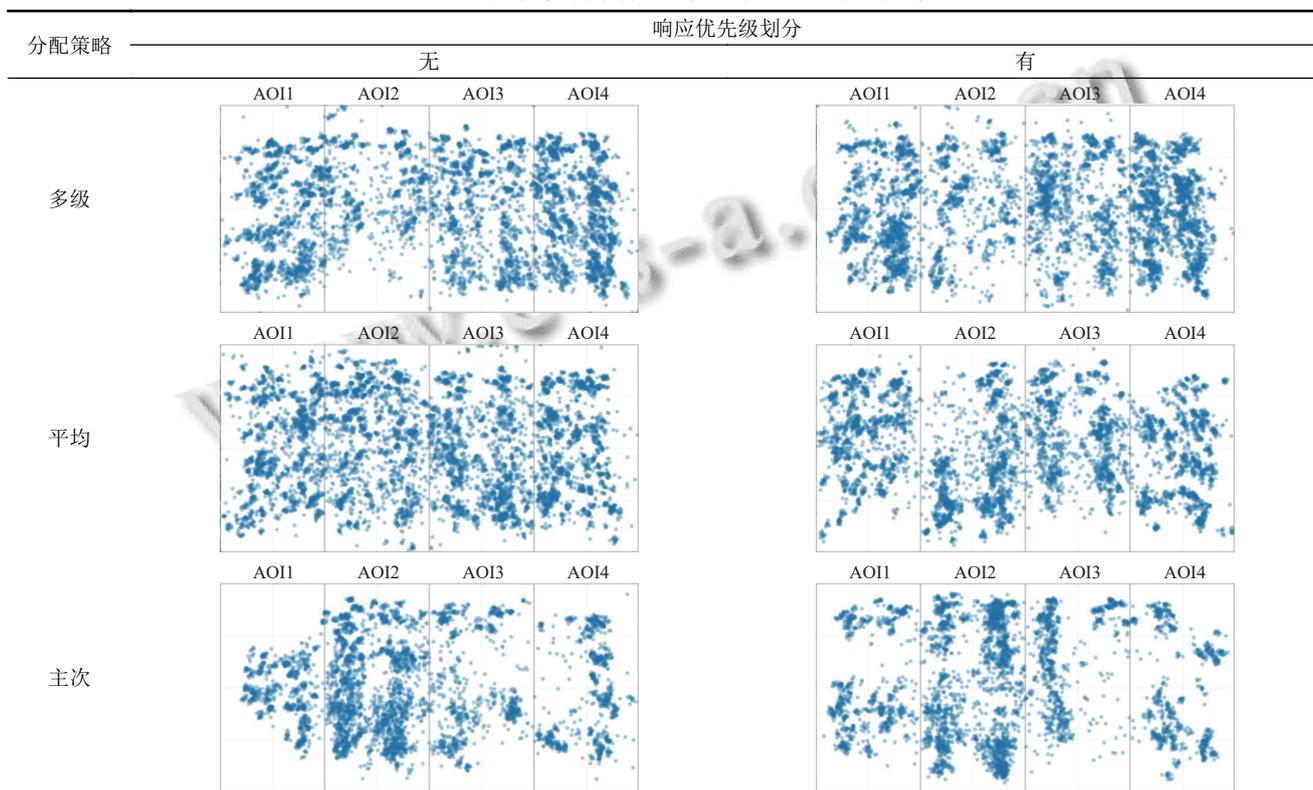


表 8 各条件因素下被试的注视-扫视比

参数	注意力分配策略			响应优先级划分	
	多级	平均	主次	无	有
平均注视持续时间 (ms)	666.115	699.246	720.903	693.265	689.705
平均扫视时间 (ms)	660.894	723.619	651.455	707.063	653.218
注视-扫视比	1.008	0.966	1.107	0.980	1.056

采用独立样本 t 检验判断响应优先级划分对平均扫视速度的影响, 结果表明, 对于平均扫视速度, 响应优先级划分对被试的影响均不具有显著差异 ($T = 0.126, P = 0.9, P > 0.05$).

3.1.4 瞳孔直径

对任务过程中的被试瞳孔直径的大小进行多因素

方差分析. 结果表明, 对于被试的瞳孔直径大小, 脑力负荷与注意力分配策略和响应优先级划分三因素之间的交互效应显著 (左眼 $F = 16.998, P = 0.000, P < 0.01$; 右眼 $F = 17.977, P = 0.000, P < 0.01$). 如图 3 所示, 在低负荷条件下, 响应优先级划分的两水平的左右眼瞳孔直径随注意力分配策略的三水平变化曲线不平行, 即两者的交互作用存在; 在高负荷条件下, 响应优先级划分的两水平的左右眼瞳孔直径随注意力分配策略的三水平变化曲线也不平行, 即两者的交互作用也存在. 然而, 响应优先级划分与注意力分配策略交互作用的形式在高低脑力负荷条件下完全不同, 说明注意力分配策略与响应优先级划分的交互作用在两种脑力负荷水平下对被试瞳孔直径大小的影响不同, 存在三因素交互效应.

表 9 平均扫视速度的均值和标准差 (像素/s)

参数	脑力负荷		注意力分配策略			响应优先级划分	
	低	高	多级	平均	主次	无	有
均值	6955.147	7033.099	7567.937	6810.425	6413.873	7009.047	6993.984
标准差	3222.921	3275.475	3541.962	3061.853	2902.608	3334.703	3174.523

表 10 注意力分配策略的平均扫视速度 LSD 事后多重比较检验

分配策略		均值差值(I-J)	标准误差	显著性	95% 置信区间	
I	J				下限	上限
多级分配	平均分配	757.512	138.846	0.000	485.266	1029.758
	主次分配	1154.063	148.722	0.000	862.454	1445.673
平均分配	多级分配	-757.512	138.846	0.000	-1029.758	-485.266
	主次分配	396.551	153.184	0.010	96.193	696.910
主次分配	多级分配	-1154.063	148.722	0.000	-1445.673	-862.454
	平均分配	-396.551	153.184	0.010	-696.910	-96.193

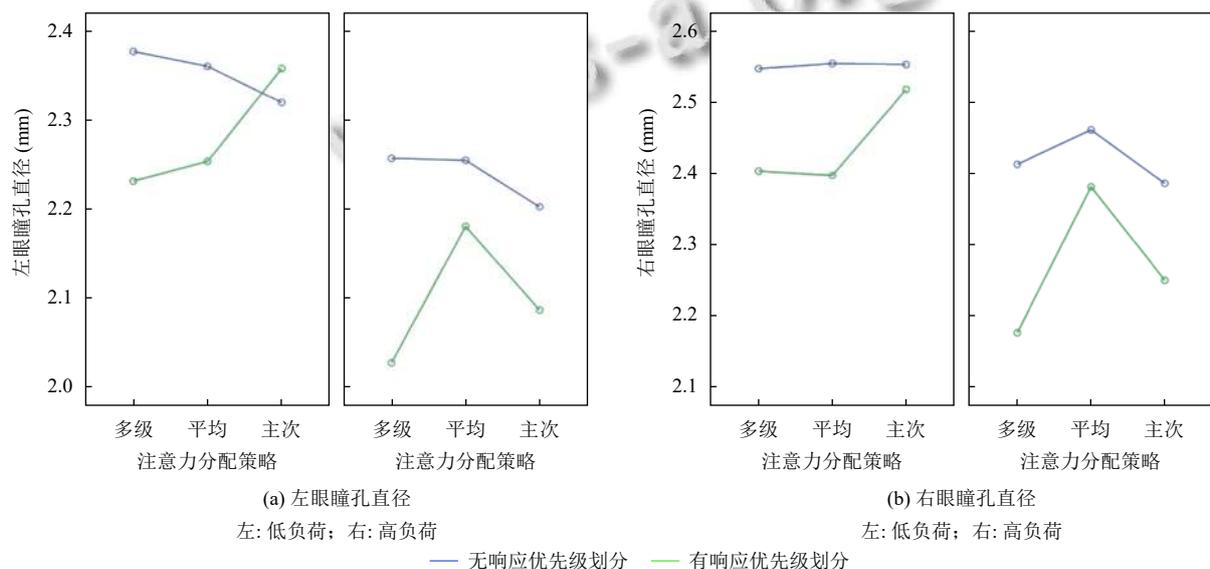


图 3 脑力负荷的三因素交互作用

基于上述结果逐一分析脑力负荷的两个水平下分配策略与响应优先级划分之间对于左右眼瞳孔直径的交互作用。结果表明,在低负荷条件下,上述两因素的交互效应显著(左眼 $F = 35.964, P = 0.000, P < 0.01$;右眼 $F = 13.829, P = 0.000, P < 0.01$);在高负荷条件下,上述两因素的交互效应显著(左眼 $F = 34.870, P = 0.000, P < 0.01$;右眼 $F = 29.508, P = 0.000, P < 0.01$)。

进一步分析高低脑力负荷条件下注意力分配策略和响应优先级划分对于左右眼瞳孔直径的单独影响。结果表明,在低负荷条件下,注意力分配策略对于瞳孔直径的主效应显著(左眼 $F = 5.543, P = 0.004, P < 0.01$;右眼 $F = 15.000, P = 0.000, P < 0.01$);响应优先级划分

对于瞳孔直径的主效应显著(左眼 $F = 62.049, P = 0.000, P < 0.01$;右眼 $F = 129.384, P = 0.000, P < 0.01$)。在高负荷条件下,注意力分配策略对于瞳孔直径的主效应显著(左眼 $F = 37.916, P = 0.000, P < 0.01$;右眼 $F = 82.619, P = 0.000, P < 0.01$);响应优先级划分对于瞳孔直径的主效应显著(左眼 $F = 277.163, P = 0.000, P < 0.01$;右眼 $F = 277.323, P = 0.000, P < 0.01$)。

瞳孔直径的描述性结果如图4所示。数据表明,被试的平均瞳孔直径在低负荷情况下较高负荷情况下更小,这与相关研究^[17]中指出的脑力负荷对瞳孔直径的影响相符合;对于响应优先级划分因素,在有优先级划分的条件下被试的平均瞳孔直径较无优先级划分的条件下更小。

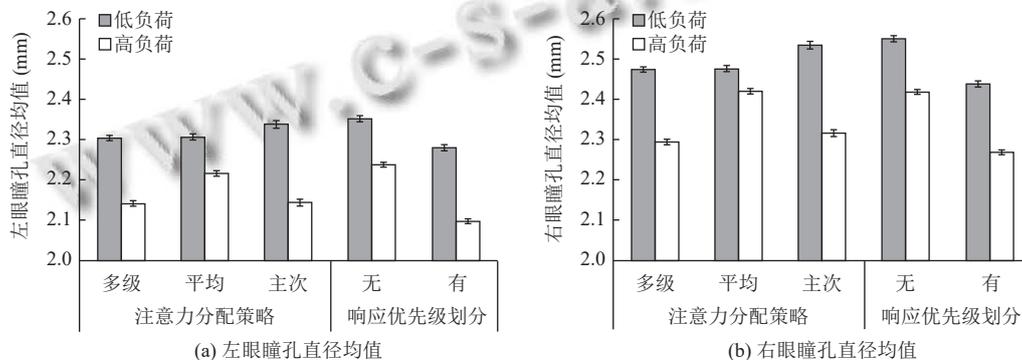


图4 瞳孔直径均值

结合注意力分配策略的左右眼瞳孔直径LSD事后比较结果发现,在低负荷条件下,主次分配策略的瞳孔直径大小显著低于多级分配(左眼 $P = 0.000$;右眼 $P = 0.000$)和平均分配(左眼 $P = 0.009$;右眼 $P = 0.000$),多级分配和平均分配之间不显著(左眼 $P = 0.378$;右眼 $P = 0.436$)。在高负荷条件下,对于左眼瞳孔直径,平均分配策略的瞳孔直径大小显著高于多级分配($P = 0.000$)和主次分配($P = 0.000$),多级分配和主次分配之间不显著($P = 0.618$);对于右眼瞳孔直径,3种分配策略间的差异显著,从平均分配(较主次 $P = 0.000$;较多级 $P = 0.000$)、主次分配(较多级 $P = 0.021$)到多级分配呈由大到小的趋势。

统计典型被试在各条件因素下随任务持续时间的瞳孔直径变化情况,如图5所示。数据显示,被试的左右眼瞳孔直径变化趋势在各条件因素下基本一致,整体上对于高脑力负荷任务,其瞳孔直径的变化幅度较低脑力负荷任务更明显。但在高负荷条件下,左右眼瞳孔直径变化对于平均分配和主次分配策略存在显著差

异,与上文中对于瞳孔直径数据的事后比较结果相吻合。

3.2 任务绩效指标测量结果

绩效是作业人员在任务过程中努力程度和操作水平的直接反映,因此可以用作人为因素的衡量指标。常用的绩效指标主要包括反应时、正确率、错误率及遗失率等。根据本文的实验设计,基于不同的分配策略及优先级划分,选择反应时间及正确率(有效响应次数与任务总刺激数的比值)作为任务绩效指标以评估任务情境中上述因素条件对被试的影响。

3.2.1 对反应时间的影响

筛选实验中有效响应的被试反应时间,分析注意力分配策略及响应优先级划分对该指标的影响。表11显示了各条件因素组合下被试的反应时间均值及标准误差。

对高低脑力负荷条件下对被试的反应时间进行双因素方差分析。结果表明,在低脑力负荷条件下,注意力分配策略与响应优先级划分主体间效应均显著(注意力分配策略 $F = 3.34, P = 0.036, P < 0.05$;响应优先

级划分 $F = 68.25, P = 0.000, P < 0.01$), 注意力分配策略与响应优先级划分之间的交互效应不显著 ($F = 0.104, P = 0.091, P > 0.05$); 在高脑力负荷条件下, 注意力分配策略与响应优先级划分主体间效应均显著 (注意力

分配策略 $F = 3.446, P = 0.032, P < 0.05$; 响应优先级划分 $F = 126.725, P = 0.000, P < 0.01$), 注意力分配策略与响应优先级划分之间的交互效应不显著 ($F = 0.443, P = 0.642, P > 0.05$).

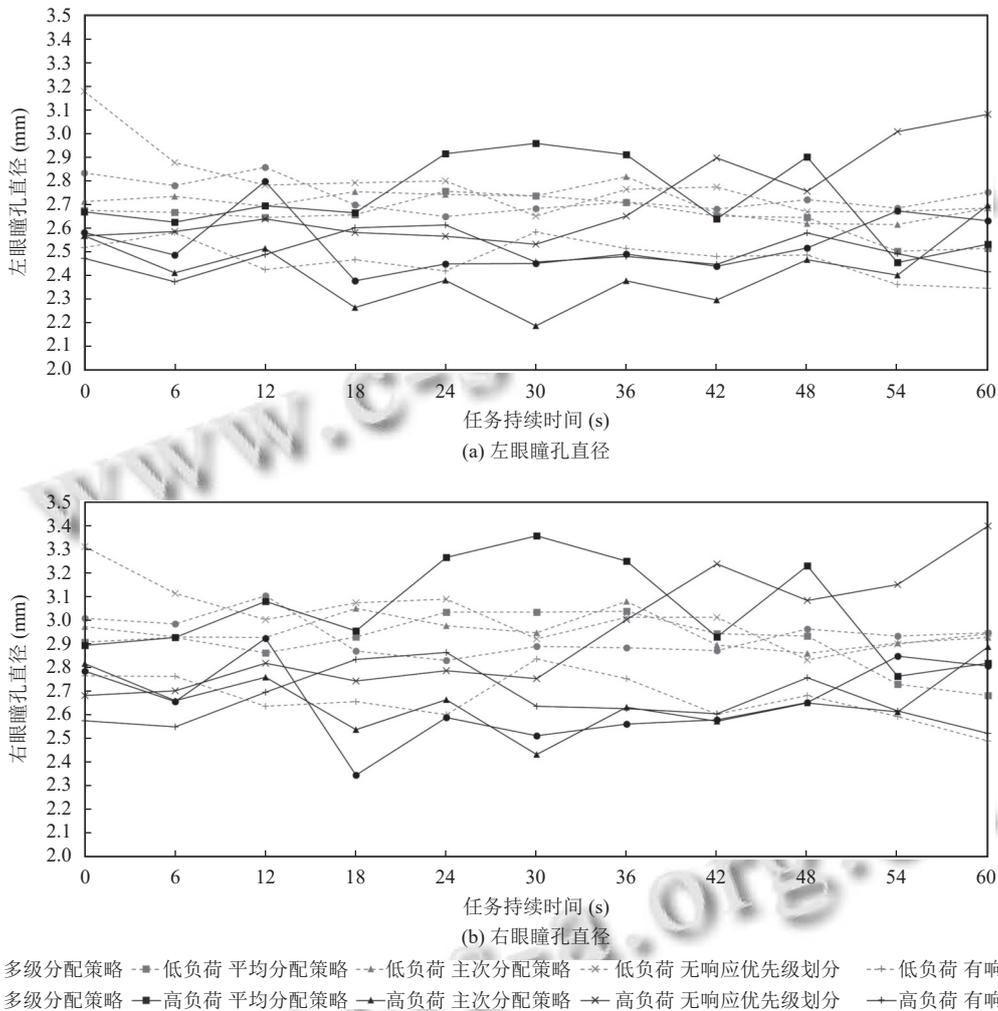


图5 各因素条件下的典型被试瞳孔变化

表11 各条件因素组合的反应时间均值与标准误差 (ms)

脑力负荷	注意力分配策略						响应优先级划分			
	多级		平均		主次		无		有	
	均值	标准误差								
低	155.309	5.652	172.606	6.313	176.351	7.289	198.869	5.356	137.309	5.180
高	155.062	4.326	171.388	4.842	166.985	5.300	195.928	3.959	133.028	3.943

对高低脑力负荷条件下的注意力分配策略进行事后检验, 结果如表12, 表13所示。

统计结果表明, 对于反应时间指标, 低负荷条件下多级分配策略与另外两种分配策略间均具有显著差异, 多级分配策略下被试的反应时间显著低于另外两种分配

策略, 而平均分配策略与主次分配策略间的差异不显著; 高负荷条件下, 除多级分配策略下被试的反应时间与平均分配策略之间的存在显著差异外, 其他分配策略间的差异均不显著. 有响应优先级划分的组在两种脑力负荷条件下对于反应时间的表现均优于未划分优先级的。

表 12 低负荷条件下注意力分配策略的反应时间 LSD 事后多重比较检验

分配策略		均值差值(I-J)	标准误差	显著性	95% 置信区间	
I	J				下限	上限
多级分配	平均分配	-23.142	8.438	0.006	-39.695	-6.589
	主次分配	-21.275	9.185	0.021	-39.294	-3.256
平均分配	多级分配	23.142	8.438	0.006	6.589	39.695
	主次分配	1.867	9.603	0.846	-16.971	20.706
主次分配	多级分配	21.275	9.185	0.021	3.256	39.294
	平均分配	-1.867	9.603	0.846	-20.706	16.971

表 13 高负荷条件下注意力分配策略的反应时间 LSD 事后多重比较检验

分配策略		均值差值(I-J)	标准误差	显著性	95% 置信区间	
I	J				下限	上限
多级分配	平均分配	-16.878	6.492	0.009	-29.609	-4.146
	主次分配	-12.426	6.841	0.069	-25.841	0.990
平均分配	多级分配	16.878	6.492	0.009	4.146	29.609
	主次分配	4.452	7.179	0.535	-9.626	18.530
主次分配	多级分配	12.426	6.841	0.069	-0.990	25.841
	平均分配	-4.452	7.179	0.535	-18.530	9.626

3.2.2 对正确率的影响

分析注意力分配策略及响应优先级划分对正确率指标的影响. 表 14 显示了各条件因素组合下被试对于实验刺激的响应正确率.

表 14 各条件因素组合的正确率 (%)

脑力负荷	注意力分配策略			响应优先级划分	
	多级	平均	主次	无	有
低	99.313	99.531	99.688	99.427	99.531
高	87.469	93.203	98.281	93.021	91.146

使用卡方检验对高低脑力负荷条件下的实验因素与被试正确率进行相关性分析, 分析结果如表 15 所示.

表 15 各实验因素与正确率的卡方检验

脑力负荷	注意力分配策略		响应优先级划分	
	列联系数	渐进显著性	列联系数	渐进显著性
低	0.021	0.421	0.007	0.654
高	0.159	0.000	0.035	0.002

可以看出, 在低脑力负荷条件下, 注意力分配策略和响应优先级划分与正确率之间的相关性不显著, 而在高脑力负荷条件下, 两个因素与正确率之间具有显著相关性. 综合各因素的正确率描述性统计结果表明, 被试在低脑力负荷情况下对于不同实验任务均能够较好地进行响应, 各组实验间的正确率差异不明显; 但在高脑力负荷情况下, 实验因素的水平间差异开始体现, 其中对于注意力分配策略因素, 从主次分配、平均分配到多级分配的正确率逐渐降低, 对于响应优先级

划分因素, 无响应优先级划分的实验组的正确率稍高于有响应优先级划分的组.

3.2.3 负荷条件对任务绩效的影响

对于反应时间指标, 采用独立样本 t 检验判断高低脑力负荷条件对其的影响, 详见表 16.

表 16 脑力负荷条件的反应时间独立样本 t 检验

脑力负荷	均值 (ms)	T	显著性
低	165.384	-3.881	0.000
高	185.133		

结果显示, 两种脑力负荷条件下的被试反应时间在 0.01 显著性水平下呈现差异, 进一步比较两组均值发现, 低脑力负荷条件下被试的反应时间低于高脑力负荷条件下的.

对于正确率指标, 采用卡方检验判断脑力负荷条件对其的影响. 结果如表 17, 表 18 所示.

表 17 脑力负荷条件与被试正确率的对称度量

指标	值	渐进显著性
按量表标定列联系数	0.152	0.000
有效个案数	11 520	—

表 18 脑力负荷条件与被试正确率的卡方检验

指标	值	自由度	渐进显著性 (双侧)	精确显著性 (双侧)	精确显著性 (单侧)
Pearson 卡方	271.676	1	0.000	—	—
连续校正	270.243	1	0.000	—	—
似然比	374.448	1	0.000	—	—
Fisher 精确检验	—	—	—	0.000	0.000
线性关联	271.653	1	0.000	—	—
有效个案数	11 520	—	—	—	—

分析结果表明两种脑力负荷条件下被试的正确率差异显著 (Pearson 卡方值 $\chi^2 = 271.676$, $P < 0.01$), 存在相关性 (列联系数 $c = 0.152$, $P < 0.01$). 进一步比较脑力负荷的正确率描述性统计结果发现, 低脑力负荷条件下被试的正确率 (99.479%) 高于高脑力负荷条件下的 (92.083%).

3.3 讨论

对眼动指标的分析结果表明, 注意力分配策略和响应优先级划分对注视行为的影响显著. 对于不同的分配策略, 被试的注视点在界面内呈现出不同的分布特征, 而是否划分响应优先级则影响注视点在 AOI 的内的聚集情况. 同一因素的水平比较结果表明, 被试在主次分配策略和没有响应优先级划分条件下较其他水平的认知处理过程更短, 可能的原因是主次分配策略相较于

另外两种策略在呈现频率的凸显性更强,更易引起被试自下而上的注意力,而划分响应优先级则增加了被试额外的认知过程,需要其通过自上而下的通路对不同优先级的信息进行判断,因而需要更长时间的注视。比较各因素条件下的注视-扫视比发现,通过对注意力分配策略和优先级划分的调整能够影响被试在任务中的搜索效率,在多级、主次分配策略和划分响应优先级条件下,被试的搜索效率更高。根据注意力的相关理论,扫视速度和瞳孔直径均能够反映被试的认知负荷情况,然而比较实际的实验结果发现不同指标间的结果存在一定差异,这可能于在实际任务中不同被试在生理和心理上的反应各有不同。但基于注视指标的相关数据,综合比较扫视速度和瞳孔直径的分析结果可以判断,注意力分配策略能够显著影响任务负荷的大小,其中被试在主次分配策略下的认知负荷相对较低;响应优先级划分对于任务负荷存在一定影响,但差异较小。进一步比较扫视速度和瞳孔直径存在差异的结果推测对于注意力分配策略,平均分配造成认知负荷增加的原因可能为信息凸显性较弱,而多级分配造成认知负荷增加的原因可能为较高的任务复杂度,而划分响应优先级造成的较高负荷也同样与复杂度有关。

分析任务绩效的实验结果发现,注意力分配策略和响应优先级划分在不同程度上影响了被试的反应时间。其中,是否划分响应优先级属于两水平因素,分析结果较为明晰,即在不同脑力负荷条件下,对刺激信息进行优先级的划分都能够大大缩短被试响应刺激的反应时间。对于分配策略因素,分析结果表明,在不同脑力负荷条件下,多级分配策略均对被试的反应时间体现出较好的影响,即相较于其他两种策略的平均反应时间更短。反之,平均分配策略下被试的反应时间相对较长,结合注视相关的眼动数据推测可能的原因是平均分配策略更易使被试的注意力分散,而另外两种分配策略则通过调整刺激频率将界面划分为具有不同重要性梯度的区域,有利于引导被试进行注意力分配。对于正确率指标,实验因素划分在低负荷条件下未能表现出显著差异,这可能使由于被试在脑力负荷不大的情况下,对于界面内刺激具有充分时间进行认知处理,因此均表现出较好的正确率绩效。然而,对于高脑力负荷的任务,被试在主次分配策略下表现出更好的绩效,这可能由于该策略在界面的不同区域刺激呈现频率间差异更大,更容易引起被试有意识地进行注意力分配。

此外,尽管无响应优先级划分的实验组的正确率稍高于有响应优先级划分的组,但总体差异值相对于分配策略因素较小。

此外,对于同一实验因素被试在反应时间和正确率的绩效表现上往往存在两极差异,即更短的反应时间可能伴随着正确率的下降。以多级分配策略为例,对于高负荷任务,被试在该条件下对于刺激的反应时间最短,但正确响应刺激的数量较其他策略更少,响应正确率最低。一个可能的原因是尽管被试在实验中能够对界面内的某一刺激信息进行较快的响应,但同时过于集中的注意力可能导致其忽视随之而来的其他信息。这与 Baddeley 在情景意识研究中提出的“注意的隧道效应”^[22]吻合,且被证明与认知负荷的强度有关^[23-25],即在高负荷情况下将注意力限制在一小部分信息源上,从而忽略与任务相关的关键信息。

4 结论与展望

本文利用眼动追踪实验探究了多优先级注意力分配策略在不同脑力负荷下对视觉注意行为及任务绩效的影响。验证了基于注意力机制的刺激分配策略和信息优先级划分对认知绩效的作用,并讨论在任务过程中不同因素条件下的视觉行为特征及与其相关的注意力机制,从而分析实验因素对注意力的影响。通过上述实验发现:①在高负荷情况下,具有更强的区域间差异的分配策略能够显著提高作业人员的任务绩效,能够缩短认知处理过程并提高搜索效率;②分配策略较响应优先级划分对视觉行为和任务绩效的影响力更强,决定了注意力在界面区域的分布情况。上述结论能够为复杂工程界面内各信息区域划分和警示信息呈现提供设计和优化参考,有利于提高作业人员的绩效表现。

然而,本文研究仍有一些未能考虑到的因素亟待研究。例如,扫视速度和瞳孔直径的实际实验结果在不同指标间存在一定差异,其可能的原因在于造成其变化的主要因素除认知负荷外还有目标兴趣度和疲劳度等,需要在未来的工作中对其进行相应的测量以排除干扰结果。同时,在后续工作中需要进一步研究分配策略在划分差异上对于任务绩效和视觉行为的影响,并建立相应的映射模型。

参考文献

- 1 Endsley MR. A taxonomy of situation awareness errors. In:

- Fuller R, Johnston N, McDonald N, eds. *Human Factors in Aviation Operations*. Aldershot: Ashgate Publishing Ltd., 1995. 287–292.
- 2 Peters RJ, Itti L. Beyond bottom-up: Incorporating task-dependent influences into a computational model of spatial attention. *Proceedings of the 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Minneapolis: IEEE, 2007. 1–8.
- 3 Ehinger KA, Hidalgo-Sotelo B, Torralba A, *et al.* Modeling search for people in 900 scenes: A combined source model of eye guidance. *Visual Cognition*, 2009, 17(6–7): 945–978. [doi: [10.1080/13506280902834720](https://doi.org/10.1080/13506280902834720)]
- 4 冯传宴, 完颜笑如, 刘双, 等. 负荷条件下注意力分配策略对情境意识的影响. *航空学报*, 2020, 41(3): 124–133.
- 5 Awh E, Belopolsky AV, Theeuwes J. Top-down versus bottom-up attentional control: A failed theoretical dichotomy. *Trends in Cognitive Sciences*, 2012, 16(8): 437–443. [doi: [10.1016/j.tics.2012.06.010](https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.06.010)]
- 6 Maljkovic V, Nakayama K. Priming of pop-out: I. Role of features. *Memory & Cognition*, 1994, 22(6): 657–672.
- 7 Anderson BA, Laurent PA, Yantis S. Value-driven attentional capture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(25): 10367–10371. [doi: [10.1073/pnas.1104047108](https://doi.org/10.1073/pnas.1104047108)]
- 8 Wickens C, McCarley J, Thomas L. Attention-situation awareness (A-SA) model. *Proceedings of the 2003 Conference on Human Performance Modeling of Approach and Landing with Augmented Displays*. Moffett Field: NASA, 2003. 189–225.
- 9 Wickens CD. Noticing events in the visual workplace: The SEEV and NSEEV models. *The Cambridge Handbook of Applied Perception Research*. In: Hoffman RR, Hancock PA, Scerbo MW, *et al.* eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. 749–768.
- 10 Koch C, Ullman S. Shifts in selective visual attention: Towards the underlying neural circuitry. In: Vaina LM, ed. *Matters of Intelligence*. Dordrecht: Springer, 1987. 115–141.
- 11 Yarbus AL. *Eye Movements and Vision*. Boston: Springer, 2013. 209–211.
- 12 Treisman AM. Strategies and models of selective attention. *Psychological Review*, 1969, 76(3): 282–299. [doi: [10.1037/h0027242](https://doi.org/10.1037/h0027242)]
- 13 吴晓莉, 薛澄岐, Tom G, 等. 数字化监控任务界面中信息特征的视觉搜索实验. *东南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(5): 807–814. [doi: [10.3969/j.issn.1001-0505.2018.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0505.2018.05.005)]
- 14 Behroozi M, Lui A, Moore I, *et al.* Dazed: Measuring the cognitive load of solving technical interview problems at the whiteboard. *Proceedings of the 40th International Conference on Software Engineering: New Ideas and Emerging Results*. Gothenburg: ACM, 2018. 93–96.
- 15 Keskin M, Ooms K, Dogru AO, *et al.* Exploring the cognitive load of expert and novice map users using EEG and eye tracking. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(7): 429. [doi: [10.3390/ijgi9070429](https://doi.org/10.3390/ijgi9070429)]
- 16 Di Stasi LL, Antoli A, Cañas JJ. Main sequence: An index for detecting mental workload variation in complex tasks. *Applied Ergonomics*, 2011, 42(6): 807–813. [doi: [10.1016/j.apergo.2011.01.003](https://doi.org/10.1016/j.apergo.2011.01.003)]
- 17 Wickens CD, Helton WS, Hollands JG, *et al.* *Engineering Psychology and Human Performance*. New York: Routledge, 2021. 596.
- 18 Kahneman D, Peavler WS. Incentive effects and pupillary changes in association learning. *Journal of Experimental Psychology*, 1969, 79(2): 312–318. [doi: [10.1037/h0026912](https://doi.org/10.1037/h0026912)]
- 19 Hahnemann D, Beatty J. Pupillary responses in a pitch-discrimination task. *Perception & Psychophysics*, 1967, 2(3): 101–105.
- 20 Lowenstein O, Loewenfeld IE. The sleep-waking cycle and pupillary activity. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1964, 117(1): 142–156.
- 21 Goldberg JH, Kotval XP. Computer interface evaluation using eye movements: Methods and constructs. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1999, 24(6): 631–645. [doi: [10.1016/S0169-8141\(98\)00068-7](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(98)00068-7)]
- 22 Baddeley AD. Selective attention and performance in dangerous environments. *British Journal of Psychology*, 1972, 63(4): 537–546. [doi: [10.1111/j.2044-8295.1972.tb01304.x](https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1972.tb01304.x)]
- 23 Reimer B. Impact of cognitive task complexity on drivers' visual tunneling. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2009, 2138(1): 13–19. [doi: [10.3141/2138-03](https://doi.org/10.3141/2138-03)]
- 24 Rantanen EM, Goldberg JH. The effect of mental workload on the visual field size and shape. *Ergonomics*, 1999, 42(6): 816–834. [doi: [10.1080/001401399185315](https://doi.org/10.1080/001401399185315)]
- 25 Williams LJ. Tunnel vision or general interference? Cognitive load and attentional bias are both important. *The American Journal of Psychology*, 1988, 101(2): 171–191. [doi: [10.2307/1422833](https://doi.org/10.2307/1422833)]

(校对责编: 孙君艳)