

【专题：设计·人因·脑科学】

不同认知难度影响因素下数据信息搜索的 视觉生理反应规律

吴晓莉^{1,2}, 唐雨欣², 薛澄岐³

(1.南京理工大学, 南京 210094; 2.河海大学, 常州 213022; 3.东南大学, 南京 211189)

摘要: **目的** 数字化产线数据监控界面中的数据图表呈现方式对监测员认知绩效的影响十分关键。以数据形式、任务种类及颜色和呈现方式为变量, 依次展开行为反应与眼动追踪实验。**方法** 以产线生产制造过程中的损失工时数据为实验材料设计实验, 通过记录行为反应数据中的反应时间和正确率, 以及眼动追踪数据中的凝视时间和瞳孔直径大小指标, 分析并讨论在不同影响因素下具有认知难度差异的数据图表认读实验中, 反应时间与正确率、凝视时间与瞳孔直径大小间的反应变化一致性规律。**结果** 数据形式、任务种类对行为反应指标, 以及呈现方式、颜色对视觉反应指标均具有显著性影响。**结论** 随着数据图表不同影响因素下的认知难度差异变化, 行为反应体现为正确率与反应时间呈一定程度负相关; 视觉反应指标体现为凝视时间与瞳孔直径变化的一致性, 并且瞳孔直径变化对颜色因素具有更高敏感度。该结论能在数据图表认知绩效的评价与设计优化中起到一定参考作用。

关键词: 认知难度; 凝视时间; 瞳孔直径; 一致性效应

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)04-0001-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.04.001

Visual Physiological Reaction Rules of Data Information Searching under Different Cognitive Difficulty Factors

WU Xiao-li^{1,2}, TANG Yu-xin², XUE Cheng-qi³

(1.Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2.Hohai University, Changzhou 213022, China; 3.Southeast University, Nanjing 211189, China)

ABSTRACT: The presentation mode of data charts in the digital production line data monitoring interface is critical to the cognitive performance of monitors. The work aims to conduct behavior response and eye tracking experiments in sequence with data form, task type, color and presentation mode as variables. The lost man-hour data in the production line was used as the material for experimental design. By recording the reaction time and accuracy in the behavioral response data, as well as the gaze time and pupil diameter indicators in the eye tracking data, different effects were analyzed and discussed. In the data chart recognition experiment with differences in cognitive difficulty under factors, the reaction time and accuracy rate, as well as the gaze time and the pupil diameter of the response change consistency law were analyzed and discussed. The experimental results showed that the data format, task type and behavioral response indicators, presentation mode and color had a significant impact on the visual response indicators. With the changes in cognitive difficulty differences under different influencing factors in the data chart, behavioral response is reflected in a certain degree of negative correlation between correctness and reaction time; visual response indicators are reflected in the consistency of gaze time and pupil diameter changes, and pupil diameter changes is more sensitive to color factors. This conclusion

收稿日期: 2020-11-02

基金项目: 江苏省社会科学基金(20YSB013); 国家社会科学基金后期资助项目(20FGLB046); 江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2019647); 江苏省自然科学基金面上项目(BK20181159); 国家自然科学基金青年基金资助项目(71601068); 江苏省哲学社会科学重点资助项目(2017ZDIXM023)

作者简介: 吴晓莉(1980—), 女, 新疆人, 博士, 南京理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为人因与设计工效学。

can play a certain reference role in the evaluation and design optimization of the cognitive performance of the data chart.

KEY WORDS: cognitive difficulty; gaze time; pupil diameter; consistency effect

在工业制造领域产线数据信息的搜索任务中,作业任务相关的信息容量大小、数据呈现的特征和方式等因素都会影响认知绩效。数据图表的认知难度越大,认知负荷水平就相对越高,对应的认知绩效就越差。行为反应指标中的反应时(RT, Reaction Time)和正确率(是衡量绩效水平的直接指标),可以反映任务完成效率及任务完成程度;在视觉生理反应指标中,凝视时长反映视觉信息认知加工中的认知绩效^[1];瞳孔直径是视觉认知加工中认知资源分配与心理负荷的重要指标^[2]。本文主要探讨数据信息图表任务中,在数据形式、颜色及呈现方式等因素的影响下,行为及视觉生理指标的变化规律及关联性。

1 数据信息认知绩效影响因素及呈现方式

在信息系统界面中,数据信息包含了具体数值、系统状态、信息关联等的数字、文字和图形元素。因此,数字和文字的大小、突显程度、排布位置、以及数据图符的形状、颜色、布局等呈现方式都是影响认知绩效的重要因素。

在信息呈现方面的相关研究中, Hick W^[3]与 Hyman^[4]提出了 Hick-Hyman 定律,认为界面视觉信息量越少,用户视觉搜索反应时间就越短; Fisher D L^[5]、Wickens C D^[6]及 Orden K F V^[7]等人的研究发现,在界面信息认知中亮度、闪烁、颜色 3 个因素能够有效地影响信息搜索时间;葛列众等人^[8]以图形为实验材料,以高可靠性图形的提示方式(没有提示、颜色、亮度、闪烁)为自变量,研究了不同提示方式对被试决策绩效的影响;曹立人等人^[9]针对不规则几何图形识别中的信息取样优先次序,认为将整体信息置于优先地位时有助于提高图形识别绩效; Montgomery D A 等人^[10]研究发现,对于多元素视觉信息的显示方式而言,亮度提示方式的信息认知速度最快,并且亮度越高,认知决策绩效越高;方浩等人^[11]研究发现柱状图更易于吸引读者的视觉注意,折线图细节突出,记忆效果最好。这些研究从信息量、信息提示方式、信息布局、信息呈现形式等方面对视觉信息呈现方式进行了研究,表明了信息呈现对认知绩效影响的重要性。

2 行为指标与视觉生理指标

反应时与正确率在绩效评价中运用普遍且较为客观,能够在一定程度上反映任务完成的效率与质量。李晶等人^[12]分析了人机界面形状特征编码对视觉认知绩效的影响,发现随着形状复杂度的增加,反应时间的增长幅度随形状特征而变化。Scharroo J 等人^[13]在刺激图形复杂度对视觉搜索影响的实验分析中,发

现干扰复杂度不变时,反应时间随着靶子复杂度的增加而增加;靶子复杂度不变时,反应时间随着干扰复杂度的增加而减少。Makovski T 等人^[14]在目标信息追踪实验中,通过分析正确率数据,发现目标特征不同时的追踪效率显著高于目标特征相同时的追踪效率。视觉评价指标(凝视时间、瞳孔直径等)被认为是衡量数字界面认知绩效水平的有效指标。Janisse M P^[15]认为,瞳孔大小的改变量是体现资源分配和认知负荷的重要指标。Just M A 等人^[16]发现在阅读任务中,阅读材料难度越大,瞳孔大小的改变量越大。李勇等人^[17]发现在文本阅读中,疲劳会使瞳孔缩小,心理负荷增大会使瞳孔放大,一定的心理负荷可以起到维持瞳孔大小不变的作用。周鹏生等人^[18]探讨了实验材料难度水平对推理问题任务的影响,发现凝视时间、瞳孔直径能有效体现被试对任务的感知和理解过程。戴斌荣等人^[19]在材料呈现方式和维度数量对分类任务的影响实验中,发现材料呈现方式从逐次呈现到全部呈现时,信息量增大,凝视时间变长,同时材料维度对凝视时间有一定影响。吴晓莉等人^[20-21]针对信息特征的视觉搜索过程,从凝视—扫视的浏览路径,分析了操作员搜索信息的注意资源分配;以信息特征及呈现方式为变量,验证了瞳孔幅度变化与凝视/扫视指标的一致性效应。因此,在不同认知难度影响因素(如数据形式、任务种类、呈现方式)下的数据图表认读实验中,行为及视觉生理指标的变化规律是本文探讨的问题。

3 实验一

3.1 实验目的

围绕工业生产制造中产线数据图表的视觉搜索,通过设定不同数据形式及任务种类变量因素。例如柱状图、子弹图和雷达图等不同数据形式,以及任务种类的完成难度等,探讨行为反应指标的变化规律,是否能反映数据形式和任务的认知难易程度。

3.2 实验设计

选用产线生产制造过程中的损失工时数据作为实验材料。损失工时的大小直接影响产线的生产率,是产线生产数据监控中关注的重要数据。实验数据形式变量以柱状图、子弹图、雷达图 3 种数据图表形式展示数据。损失工时数据一般只需要重点关注数值大小,多直接采用传统柱状图表示。子弹图除了单一的数据比较功能之外,可以通过添加合理的度量标尺,显示更精确的阶段性数据信息,在工业数据表达方面极具应用价值。雷达图可以集中展现各个数据的权重高低情况,并且可以通过雷达图图形的面积大小对对象进行多

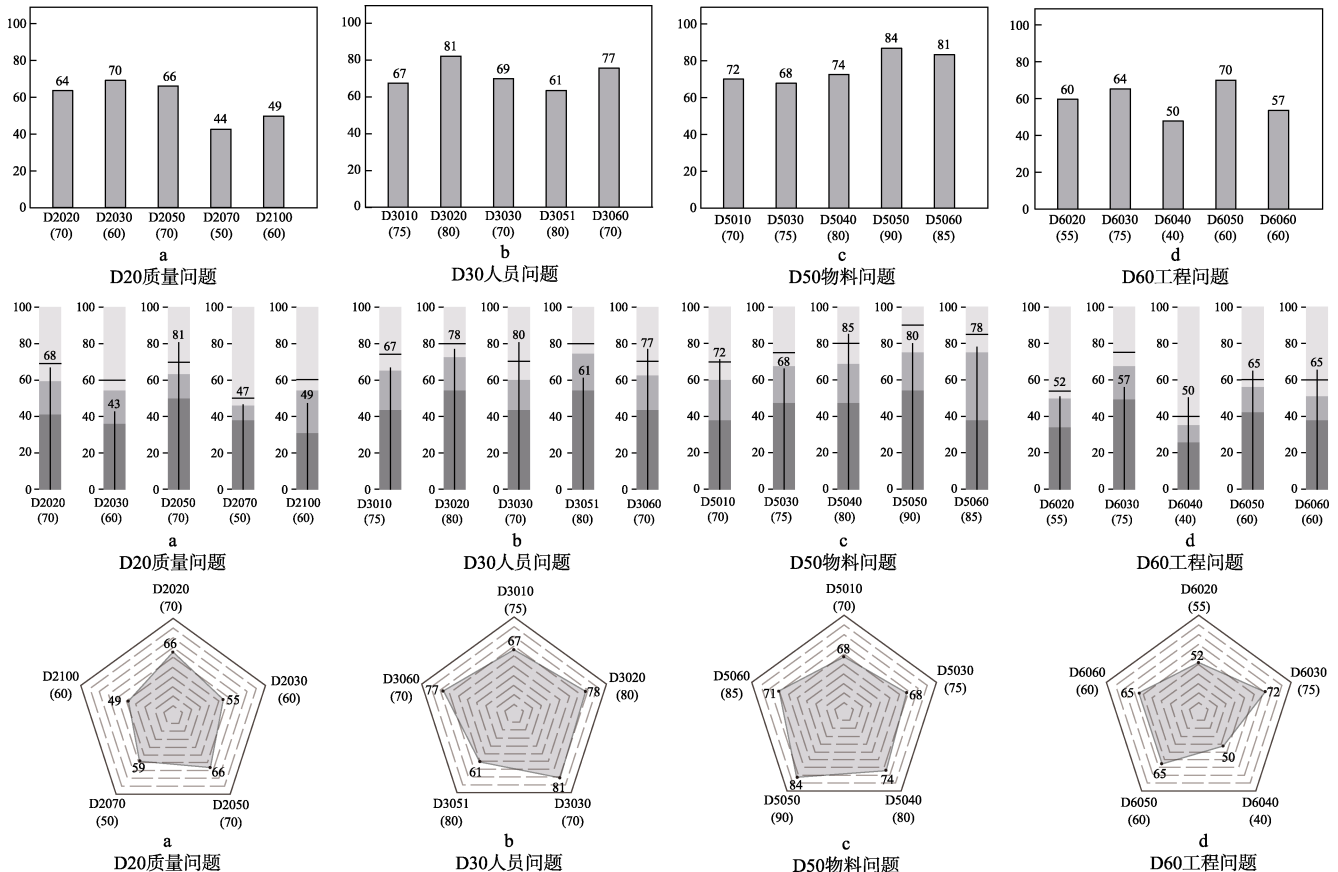


图 1 4 种数据图表形式实验材料
Fig.1 Four data chart forms of experimental materials

方位诊断评价。实验中每张数据图表材料展示 4 种类型的损失工时数据，包括质量问题、人员问题、物料问题和工程问题。每个问题下的细分小类事件在数据图表中用编号代码表示，4 种数据图表形式实验材料见图 1。

实验设置的第二个变量为任务种类，包括数值对比任务（任务 1）和数值状态判断任务（任务 2）。因此不同种类任务下，不同数据形式的认知难度具有差异性，以此考察不同难度差异下行指标的变化。

3.3 实验流程

以数据形式（3 组）和任务种类（2 组）为变量因素，每组数据形式设计随机性实验材料 8 个，共包含 8×3 个刺激材料。正式实验过程根据实验任务分为两个模块，每个模块包含 24 个实验，3 种数据图表形式随机出现，被试通过按动 1~4 的数字键进行反馈。

3.4 实验设备与被试

实验设备为 1 台 15.6 英寸的计算机，用于呈现刺激，屏幕分辨率为 1366 像素×768 像素，实验程序采用 E-prime 编写。被试为河海大学研究生和本科生，共计 22 名（男女各 11 人），均为工科背景，平均年龄 23 周岁，无色弱、色盲等现象，矫正视力在 1.0 以上。

3.5 实验结果

在实验被试 22 人中，获取了 20 人的有效数据样本。删除组内反应时间平均数上下两个标准差之外的异常数据，最后一共保留了 96.6% 的数据。

对反应时数据进行方差齐性检验，任务 1 条件下数据形式 ($P=0.066$, $P>0.05$)、任务 2 条件下数据形式 ($P=0.196$, $P>0.05$)、柱状图下任务种类 ($P=0.698$, $P>0.05$)、子弹图下任务种类 ($P=0.971$, $P>0.05$)、雷达图下任务种类 ($P=0.411$, $P>0.05$) 的显著性均大于 0.05，即方差齐性假设成立，因此可以对数据进行下一步方差分析。

对两组任务中数据形式变量进行单因素方差分析，结果显示，在任务 1 和任务 2 组内，数据形式对反应时间均具有显著性影响，见表 1。对 3 种数据形式组内任务种类变量进行单因素方差分析，发现 3 种数据形式组内不同任务种类对反应时间均具有显著性影响，见表 2。对反应时间和正确率数据进行统计，见图 2。

3.5.1 反应时间分析

反应时间数据表明，在任务 1 数值对比任务下，随着数据形式从柱状图、子弹图到雷达图，任务完成难度逐渐变难，反应时间也随之变长；在任务 2 数值状态判断任务下，随着数据形式从子弹图、柱状图到

表 1 不同任务组内数据形式因素反应时间方差分析
Tab.1 Analysis of variance of response time for data forms in different task groups

任务	组	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	显著性
任务 1	组间	156 163 574.199	2	78 081 787.100	23.930	0.000
	组内	1 530 284 913.019	469	3 262 867.618	—	—
	总计	1 686 448 487.218	471	—	—	—
任务 2	组间	924 938 633.870	2	462 469 316.935	324.091	0.000
	组内	660 688 735.977	463	1 426 973.512	—	—
	总计	1 585 627 369.848	465	—	—	—

表 2 不同数据形式组内任务种类因素反应时间方差分析
Tab.2 Analysis of variance of response time for task types in different data forms

数据形式	组	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	显著性
柱状图	组间	663 474 242.278	1	663 474 242.278	462.386	0.000
	组内	456 295 543.394	318	1 434 891.646	—	—
	总计	1 119 769 785.672	319	—	—	—
子弹图	组间	112 763 817.753	1	112 763 817.753	82.859	0.000
	组内	432 771 679.219	318	1 360 917.230	—	—
	总计	545 535 496.972	319	—	—	—
雷达图	组间	276 877 750.878	1	276 877 750.878	164.704	0.000
	组内	534 577 140.594	318	1 681 060.191	—	—
	总计	811 454 891.472	319	—	—	—

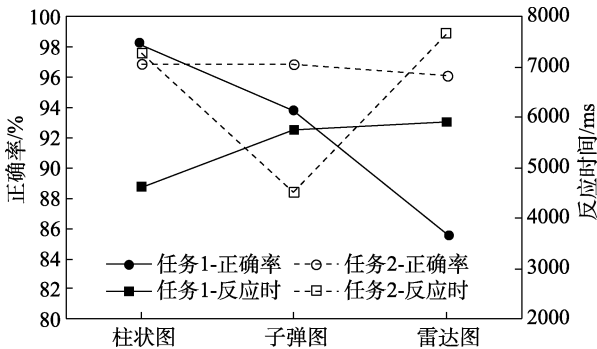


图 2 正确率与反应时间对比
Fig.2 Comparison of accuracy and response time

雷达图,任务完成难度增加,反应时间也呈增长趋势。

对比同一数据形式组内不同任务的反应时间,柱状图和雷达图的任务 2 反应时间均明显长于任务 1,说明柱状图和雷达图由于图形形式无明显数值状态定性标识,所以在数值状态识别任务中需要花费更多的努力进行认知加工,反应时间变长。子弹图的任务 2 反应时间短于其任务 1,表示子弹图更适合数值状态识别任务。

3.5.2 正确率分析

正确率数据显示,在任务 1 数值对比任务中,从柱状图到雷达图,正确率逐渐降低,与反应时间数据成反比,即反应时间越长,正确率越低。在任务 2 数值状态判断任务中,不同数据形式正确率差别不明显,表明由于任务情景的不同,任务 2 相较于任务 1 需要更集中注意力,逐一观察数据进行判断,所以反应时间较

任务 1 更长,但正确率却都能保持在较高水平,因此正确率数据在不同任务情景下的变化敏感度具有差别。

同一数据图表形式下,子弹图形式在不同任务下的正确率与反应时间呈反比;雷达图形式在任务 2 下的正确率与反应时间呈正比;柱状图形式下的两组任务正确率均保持较高水平,未表现出明显差异,任务 1 正确率稍高于任务 2,与反应时间数据呈反比。

3.6 实验小结

1) 在产线数据图表任务中,数据形式和任务种类对行为反应指标有显著影响。数值对比任务下,柱状图数据形式简单直观更易于识别;数值状态判断任务下,子弹图形式具有度量标记,判断数值更容易。

2) 行为反应数据表明,随着数据形式在数值对比任务下从柱状图到雷达图,再由在数值状态判断任务下从子弹图到雷达图,反应时间呈明显递增趋势,正确率具有减少趋势,即反应时间与正确率大致呈反比。说明行为反应指标能够反映数据图表的认知难度,反应时间敏感度更高,正确率指标在不同任务情景下的变化敏感度具有差别。

4 实验二

4.1 实验目的

以数据呈现方式和颜色为变量因素,通过记录被试在数值比较任务中的凝视时间及瞳孔直径指标,分析在呈现方式和颜色因素影响下的不同认知难度数据图表的视觉指标变化规律。

4.2 实验设计

实验采用产线制造中的日常损失工时进行设计，呈现 12 个月各类日常损失时间数据。呈现方式变量包含 5 个水平：（1）呈现方式 1，采用单柱状图形式，包含 1 组数据（异常损失时间）；（2）呈现方式 2，采用气泡图形式，包含两组数据（异常损失时间及其占比）；（3）呈现方式 3，采用双折线图形式，包含两组数据（异常损失时间及其占比）；（4）呈现方式 4，采用双柱状图形式，包含两组数据（异常损失时间及其占比）；（5）呈现方式 5，采用柱状折线结合图形式，包含 4 组数据（异常损失时间及其占比、正常损失时间、未记录时间）。

从呈现方式 1 到呈现方式 5，呈现的数据信息量变大，并且呈现形式变复杂，认知难度之间具有一定差异。颜色变量设置为两种水平：（1）灰色，采用灰度对数据组进行区分和标注；（2）彩色，采用彩

色对数据组进行区分和标注。

颜色作为变量是刺激材料设计的重要因素之一。考虑到工业系统中数据图表的常用状态颜色，以红、黄、绿 3 色为实验中彩色形式数据图形用色。将 3 种颜色的实验刺激材料按相同概率交替出现，不考虑不同色彩对视觉认知的影响。然而考虑到不同明度、饱和度的交替出现可能会影响到眼动数据，对选取的红、黄、绿 3 种基础色进行 HSB 调和，使其明度、饱和度保持一致，具体调整后的 HSB 和 RGB 数值，见表 3。实验刺激材料见图 3。

表 3 实验材料颜色设定
Tab.3 Color setting of experimental materials

颜色	HSB	RGB
红	0/80/70	179/36/36
黄	60/80/70	179/175/36
绿	150/80/70	36/179/107

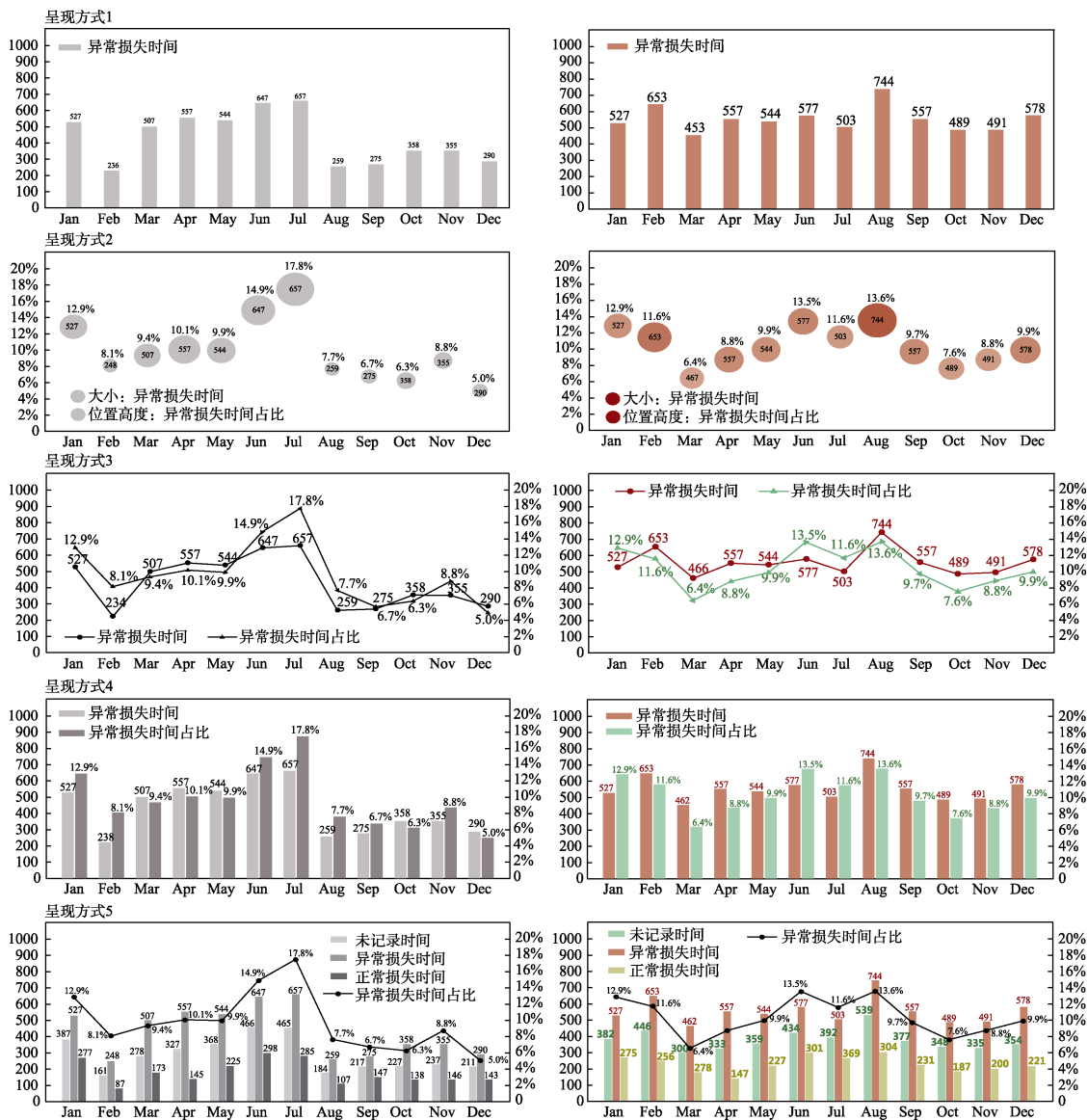


图 3 实验刺激材料
Fig.3 Experimental stimulus material

4.3 实验流程

实验变量因素为呈现方式(5组)和颜色(2组),其中每组设计随机性实验材料3个,因此本次实验共包含5×2×3个刺激材料。实验任务为数值比较任务,实验任务完成情况通过刺激材料呈现之后设置的问卷选择题进行反馈,防止被试任务完成过程中注意力不集中,认真程度低,导致实验数据可信度不高。

4.4 实验设备与被试

实验眼动设备使用瑞典 Tobii 公司生产的用于人因工程及心理学领域的 Tobii1 X120 眼动仪,采样频率为 120 HZ,注视定位精度为 0.4 度,采用双眼采集方式,头部运动范围为 44 cm×22 cm×30 cm;一台计算机,显示器分辨率为 1920 像素×1080 像素,颜色质量为 32 位。被试总人数为 16 人,其中男生 8 人,女生 8 人,年龄在 22~28 周岁之间,平均年龄 24 周岁,均为右利手,视力或矫正视力正常。

4.5 实验结果

实验被试共 16 人,选取信息采集率大于 90%的 12 人的数据。并剔除组内反应时间平均数上下两个标准差之外的异常数据,最后一共保留了 94.4%的数据,用于最终实验分析。

4.5.1 凝视总时间

由凝视总时间的方差齐性检验 ($P=0.125$, $P>0.05$) 可知,其显著性大于 0.05,即方差齐性假设成立,因此可以对数据进行下一步方差分析。

对凝视总时间进行多因素方差分析,得到呈现方式主体间效应均显著 ($F=23.703$, $P=0.000$, $p<0.01$),颜色因素主体间效应不显著 ($F=2.724$, $P=0.1$, $p>0.05$);呈现方式与颜色因素交互效应显著 ($F=6.067$, $P=0.000$, $p<0.01$),见表 4。

数据图表凝视总时间对比见图 4,可以看出从单

柱状图呈现方式到柱状折线结合呈现方式,随着呈现方式变复杂,凝视总时间变长。针对呈现方式因素进一步进行凝视总时间的 LSD 验后多重比较检验,分析呈现方式之间的具体差异,见表 5。气泡图、双折线图和双柱状图之间的凝视总时间没有显著性差异,即 3 种呈现方式在凝视总时间上并未体现出难度差异性。

表 4 凝视时间的呈现方式与颜色因素的主体间效应检验

Fig.4 Intersubjective effect test of the presentation mode of gaze time and color factor					
源	III 类平方和	自由度	均方	F	显著性
修正模型	677.390 ^a	9	75.266	13.534	0.000
截距	9 352.893	1	9 352.893	1 681.813	0.000
呈现方式	527.274	4	131.818	23.703	0.000
颜色	15.150	1	15.150	2.724	0.100
呈现方式与颜色	134.966	4	33.742	6.067	0.000
误差	1 946.419	350	5.561	—	—
总计	11 976.702	360	—	—	—
修正后总计	2 623.808	359	—	—	—

注: a. R 方=0.319 (调整后 R 方=0.301)

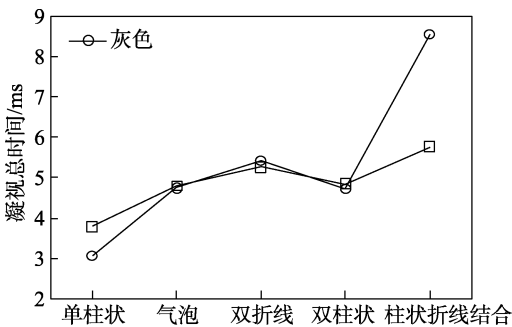


图 4 数据图表凝视总时间对比

Fig.4 Comparison of data chart of total staring time

表 5 呈现方式的凝视时间 LSD 验后多重比较检验

Tab.5 LSD posterior multiple comparison test for gaze time in presentation mode

(I) 呈现方式	(J) 呈现方式	平均值差值 (I-J)	标准误差	显著性	95%置信区间	
					下限	上限
气泡	单柱状	1.346 25*	0.405 03	0.001	0.549 7	2.142 8
	双折线	-0.568 89	0.405 03	0.161	-1.365 4	0.227 7
	双柱状	-0.012 92	0.405 03	0.975	-0.809 5	0.783 6
	柱状折线结合	-2.39 083*	0.405 03	0.000	-3.187 4	-1.594 3
双折线	单柱状	1.915 14*	0.405 03	0.000	1.118 6	2.711 7
	气泡	0.568 89	0.405 03	0.161	-0.227 7	1.365 4
	双柱状	0.555 97	0.405 03	0.171	-0.240 6	1.352 5
	柱状折线结合	-1.821 94*	0.405 03	0.000	-2.618 5	-1.025 4
双柱状	单柱状	1.359 17*	0.405 03	0.001	0.562 6	2.155 7
	气泡	0.012 92	0.405 03	0.975	-0.783 6	0.809 5
	双折线	-0.555 97	0.405 03	0.171	-1.352 5	0.240 6
	柱状折线结合	-2.377 92*	0.405 03	0.000	-3.174 5	-1.581 4

注: *表示平均值差值的显著性水平为 0.05

表 6 呈现方式组内颜色单因素凝视时间方差分析
Tab.6 Analysis of variance of color single factor gaze time in the presentation mode group

呈现方式	组	平方和	自由度	均方	F	显著性
单柱状	组间	9.563	1	9.563	6.079	0.016
	组内	110.116	70	1.573	—	—
	总数	119.679	71	—	—	—
气泡	组间	0.060	1	0.060	0.011	0.916
	组内	373.117	70	5.330	—	—
	总数	373.176	71	—	—	—
双折线	组间	0.502	1	0.502	0.076	0.784
	组内	465.076	70	6.644	—	—
	总数	465.577	71	—	—	—
双柱状	组间	0.240	1	0.240	0.047	0.829
	组内	357.593	70	5.108	—	—
	总数	357.834	71	—	—	—
柱状折线结合	组间	139.751	1	139.751	15.273	0.000
	组内	640.517	70	9.150	—	—
	总数	780.269	71	—	—	—

表 7 瞳孔直径的呈现方式与颜色因素的主体间效应检验
Tab.7 Presentation mode of pupil diameter and intersubjective effect test of color factor

源	III 类平方和	自由度	均方	F	显著性
修正模型	970.855 ^a	9	107.873	1 476.062	0.000
截距	1 332 550.617	1	1 332 550.617	18 233 758.786	0.000
呈现方式	259.382	4	64.845	887.303	0.000
颜色	337.859	1	337.859	4 623.044	0.000
呈现方式与颜色	77.383	4	19.346	264.714	0.000
误差	10 868.244	148 714	0.073	—	—
总计	1 525 110.538	148 724	—	—	—
修正后总计	11 839.099	148 723	—	—	—

注：a. R 方=0.319（调整后 R 方=0.301）

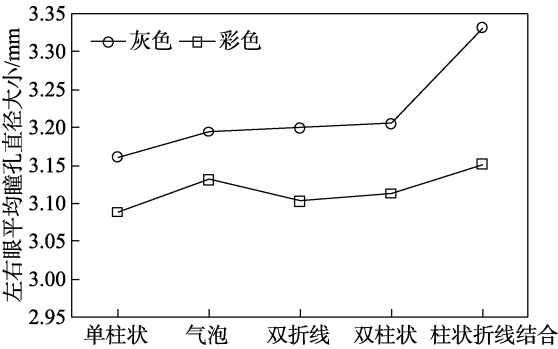


图 5 数据图表瞳孔直径大小对比
Fig.5 Comparison of pupil diameter in data chart

针对颜色因素,通过结合图 4 和对数据图表呈现方式进行的分组的颜色单因素方差分析,见表 6,可以得到在柱状折线结合图中,彩色形式凝视总时间显著短于灰色形式,彩色形式由于对数据组区分较灰色形式更明显,所以在对数据进行分辨处理时难度更低;单柱状图中彩色形式凝视总时间显著长于灰色形

式,其他 3 种呈现方式基本没有差异。

4.5.2 瞳孔直径

取左右眼瞳孔大小的平均直径作为瞳孔直径大小的分析数据,进行方差齐性检验 ($P=0.085$, $P>0.05$),其显著性大于 0.05,即方差齐性假设成立,因此可以对数据进行下一步方差分析。

对瞳孔直径大小进行多因素方差分析,得出数据图表呈现方式主体间效应显著 ($F=887.303$, $P=0.000$, $p<0.01$);颜色主体间效应显著 ($F=4 623.044$, $P=0.000$, $p<0.01$);呈现方式与颜色交互效应显著 ($F=264.714$, $P=0.000$, $p<0.01$),见表 7。

数据图表瞳孔直径大小对比见图 5,可知呈现方式随着数据图表复杂程度从单柱状图到柱状折线结合图,瞳孔直径逐渐增大,柱状折线结合图呈现方式的瞳孔直径明显大于其他呈现方式,与凝视总时间变化趋势一致。针对呈现方式因素进一步进行凝视总时间的 LSD 验后多重比较检验,见表 8,可知气泡图、

双折线图和双柱状图呈现方式的瞳孔直径数据之间的差异性均具有显著性。瞳孔直径数据反映出在这 3 种表达同等信息量的呈现方式中,折线图更具优势,瞳孔直径相对更小,认知难度最低。

针对颜色因素,通过结合图 5 和对数据图表呈现方式进行的分组的颜色单因素方差分析,见表 9,可以看出灰色形式下的瞳孔直径明显大于彩色形式,5 种呈现方式中组内的灰色形式瞳孔直径大小与彩色形式瞳孔直径大小均存在显著性差异。表明在数据图表的呈现中,采用颜色区分数据组别和进行数值标注相较于采用灰度区分数据组别,在目标数据认读搜索任务中,能够明显降低认知难度(认知负荷),提高

认知绩效水平。

4.6 实验讨论

4.6.1 凝视总时间与瞳孔直径反映灵敏度比较

呈现同等信息量的 3 种数据形式之间,以及其灰色和彩色形式之间的认知难度差异,在凝视总时间数据中未反映出。

瞳孔直径数据显示在呈现同等信息量下的 3 种呈现方式中,折线图呈现方式下的瞳孔直径明显小于气泡图和双柱状图形式。同时在颜色因素对比中,彩色数据形式的瞳孔直径整体均小于灰色数据形式,具有显著性差异。

表 8 呈现方式的瞳孔直径 LSD 验后多重比较检验
Tab.8 Pupil diameter LSD posterior multiple comparison test of presentation mode

(I) 呈现方式	(J) 呈现方式	平均值差值 (I-J)	标准误差	显著性	95%置信区间	
					下限	上限
气泡	单柱状	0.037 8*	0.002 64	0.000	0.032 6	0.043 0
	双折线	0.016 4*	0.002 29	0.000	0.011 9	0.020 9
	双柱状	0.004 6*	0.002 26	0.041	0.000 2	0.009 1
	柱状折线结合	-0.103 0*	0.002 05	0.000	-0.107 0	-0.099 0
双折线	单柱状	0.021 4*	0.002 64	0.000	0.016 2	0.026 5
	气泡	-0.016 4*	0.002 29	0.000	-0.020 9	-0.011 9
	双柱状	-0.011 8*	0.002 26	0.000	-0.016 2	-0.007 4
	柱状折线结合	-0.119 4*	0.002 05	0.000	-0.123 4	-0.115 4
双柱状	单柱状	0.033 2*	0.002 61	0.000	0.028 1	0.038 3
	气泡	-0.004 6*	0.002 26	0.041	-0.009 1	-0.000 2
	双折线	0.011 8*	0.002 26	0.000	0.007 4	0.016 2
	柱状折线结合	-0.107 6*	0.002 01	0.000	-0.111 6	-0.103 7

注: *表示平均值差值的显著性水平为 0.05

表 9 呈现方式组内颜色单因素瞳孔直径方差分析
Tab.9 Analysis of variance of single factor pupillary diameter of color in presentation mode group

呈现方式	组	平方和	自由度	均方	F	显著性
单柱状	组间	22.315	1	22.315	381.767	0.000
	组内	987.657	16 897	0.058	—	—
	总数	1 009.972	16 898	—	—	—
气泡	组间	27.892	1	27.892	466.162	0.000
	组内	1 663.996	27 811	0.060	—	—
	总数	1 691.887	27 812	—	—	—
双折线	组间	64.578	1	64.578	1 195.223	0.000
	组内	1 499.816	27 759	0.054	—	—
	总数	1 564.394	27 760	—	—	—
双柱状	组间	62.245	1	62.245	1 162.199	0.000
	组内	1 571.612	29 344	0.054	—	—
	总数	1 633.857	29 345	—	—	—
柱状折线结合	组间	351.162	1	351.162	3 201.171	0.000
	组内	5 145.162	46 903	0.110	—	—
	总数	5 496.324	46 904	—	—	—

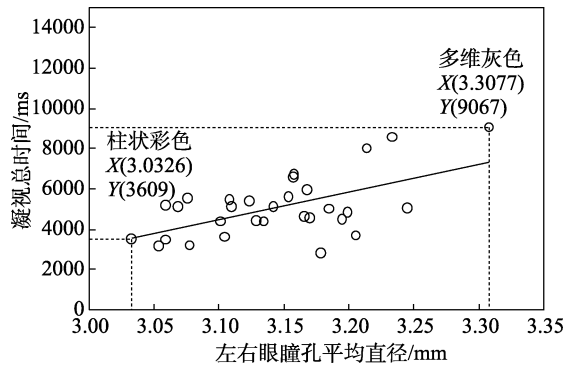


图 6 瞳孔直径与凝视总时间一致性比较

Fig.6 Consistency comparison of pupil diameter and total staring time

在数据图表数值对比任务中,瞳孔直径大小指标变化相较于凝视总时间而言灵敏度更高,并体现出对颜色因素的反应显著性。

4.6.2 凝视总时间与瞳孔直径变化的一致性讨论

将左右眼的平均瞳孔直径作为自变量 X , 凝视总时间作为因变量 Y , 将实验中 30 个刺激材料的瞳孔直径和凝视总时间数据绘制成散点图, 见图 6。随着自变量 X 的逐渐增大, 因变量 Y 也整体呈现出同样的变化趋势。根据图中圆点位置可以看出, 认知难度最小的是彩色的柱状图数据呈现 ($X: 3.0326$, $Y: 3609$), 认知难度最大的是灰色的多维数据呈现 ($X: 3.4577$, $Y: 9067$), 与单独指标分析得出的结果一致。并且实验中, 随着数据图表认知难度的增加, 瞳孔直径随之增加, 凝视时间也变长, 表现出一致性的变化。

4.7 实验小结

1) 在数据图表数值比较实验任务中, 数据图表呈现方式和颜色因素对凝视总时间与瞳孔直径变化指标均有显著性影响。随着数据图表呈现方式变复杂, 信息量变大, 寻找目标信息时的干扰信息项随之变多, 因此需要更多的认知资源用于信息加工, 这又导致认知难度增加, 凝视总时间与瞳孔直径也都随之增大。其中瞳孔直径变化指标反映出, 在呈现信息量相当的情况下, 折线图对于数据识别更具优势。

2) 在实验中数据图表数值对比任务下, 相较于凝视时间而言, 瞳孔直径变化指标具有更高的变化敏感度, 并且瞳孔直径变化数据反映, 颜色因素是影响数据图表阅读中认知绩效的重要因素。在数据图表呈现信息量较大时, 通过颜色区分数据类别和标注关键数据能极大提高认知绩效, 降低数据搜索任务难度。

3) 在数据图表数值对比任务中, 瞳孔直径变化幅度与凝视总时间指标变化具有一致性。随着数据图表认知难度从彩色单柱状图呈现方式到灰色柱状折线结合图呈现方式, 瞳孔直径与凝视时间变化呈线性递增趋势, 具有一致性变化效应。

5 结语

实验一的行为反应数据表明, 从数值对比任务中的柱状图到雷达图, 以及从数值状态判断任务中的子弹图到雷达图, 反应时间呈增加趋势, 正确率相应降低, 与反应时间呈反比, 并且正确率指标在不同任务情景下的变化敏感度具有差别。行为反应绩效指标在一定程度上能够反映数据图表形式和任务种类的认知难度差异。

实验二的视觉生理反应数据表明, 从彩色单柱状呈现方式到灰色柱状折线结合呈现方式, 凝视总时间逐渐变长, 同时瞳孔直径也呈增长趋势, 具有一致性的变化规律。并且瞳孔直径指标对颜色因素体现出更高的敏感度, 能有效反映出认知绩效的差异。

在数据图表呈现方式设计中, 可结合以上行为及视觉指标变化规律, 对数据图表进行认知绩效评价从而改进。后期研究可以进一步针对多种呈现方式变量, 通过对其量化编码, 探讨不同呈现方式变量条件下行为及视觉指标的变化规律。

参考文献:

- [1] GOLDBERG J H, KOTVAL, XERXES P. Computer Interface Evaluation Using SDS Ovements: Methods and Constructs[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1999, 24: 631-645.
 - [2] HESS E H, JANISSE M P. Pupillometrics: the Psychology of the Pupillary Response[J]. The American Journal of Psychology, 1978, 91(3): 547.
 - [3] HICK W. On the Rate of Gain of Information[J]. Journal of Experimental Psychology, 1952, 4(1): 11-26.
 - [4] HYMAN, RAY. Stimulus Information as a Determinant of Reaction Time[J]. Journal of Experimental Psychology, 1953, 45(3): 188-196.
 - [5] FISHER D L, TAN K C. Visual Displays: the Highlighting Paradox[J]. Human Factors the Journal of the Human Factors & Ergonomics Society, 1989, 31(1): 17-30.
 - [6] WICKENS C D, ANDRE A D. Proximity Compatibility and Information Display: Effects of Color, Space, and Objectness on Information Integration[J]. Human Factors the Journal of the Human Factors & Ergonomics Society, 1990, 32(1): 61-77.
 - [7] ORDEN K F V, DIVITA J, SHIM M J. Redundant Use of Luminance and Flashing with Shape and Color as Highlighting Codes in Symbolic Displays[J]. Human Factors the Journal of the Human Factors & Ergonomics Society, 1993, 35(2): 195-204.
 - [8] 葛列众, 张俊红. 不同提示方式的多元图形视觉显示工效学研究[J]. 心理科学, 2001(2): 135-137.
- GE Lie-zhong, ZHANG Jun-hong. Ergonomics of Multiple Graphic Visual Display with Different prompts[J].

- Psychological Science, 2001(2): 135-137.
- [9] 曹立人, 李永梅. 不规则几何图形识别中的信息取样优先序[J]. 心理学报, 2003(1): 44-49.
CAO Li-ren, LI Yong-mei. Information Sampling Priority in Recognition of Irregular Geometric Shapes[J]. Acta Psychology, 2003(1): 44-49.
- [10] MONTGOMERY D A, SORKIN R D. Observer Sensitivity to Element Reliability in a Multielement Visual Display[J]. Human Factors the Journal of the Human Factors & Ergonomics Society, 1996, 38(3): 484-494.
- [11] 方浩, 尚媛媛, 张锐, 等. 数据新闻中信息图表的阅读效果: 来自眼动的证据[J]. 图书情报工作, 2019, 63(8): 74-86.
FANG Hao, SHANG Yuan-yuan, ZHANG Rui, et al. Reading Effects of Infographics in Data News: Evidence from Eye Movement[J]. Books and Intelligence Work, 2019, 63(8): 74-86.
- [12] 李晶, 郁舒兰, 吴晓莉. 人机界面形状特征编码对视觉认知绩效的影响[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(1): 163-172.
LI Jing, YU Shu-lan, WU Xiao-li. Effects of Human-Computer Interface Shape Feature Coding on Visual Cognitive Performance[J]. Journal of Computer-Aided Design and Graphics, 2018, 30(1): 163-172.
- [13] SCHARROO J, STALMEIER P F M, BOSELIE F. Visual Search and Segregation as a Function of Display Complexity[J]. The Journal of General Psychology, 1994, 121(1): 5-17
- [14] MAKOVSKI T, JIANG Y V. The Role of Visual Working Memory in Attentive Tracking of Unique Objects[J]. Journal of Experimental Psychology Human Perception & Performan, 2009, 35(6): 1687.
- [15] JANISSE M P. Pupillometry: the Psychology of the Pupillary Response[J]. Journal of Personality Assessment, 2010, 44(4): 441-444.
- [16] JUST M A, CARPENTER P A. The Intensity Dimension of Thought: Pupillometric Indices of Sentence Processing[J]. Canadian Journal of Experimental Psychology, 1993, 47(2): 310-339.
- [17] 李勇, 阴国恩, 陈燕丽. 阅读中疲劳、心理负荷因素对瞳孔大小的调节作用[J]. 心理与行为研究, 2004(3): 545-548.
LI Yong, YIN Guo-en, CHEN Yan-li. Effects of Fatigue and Psychological Load Factors on Pupil Size Regulation During Reading[J]. Psychological and Behavioral Research, 2004(3): 545-548.
- [18] 周鹏生, 周爱保. THOG 推理影响因素的眼动研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(2): 167-172.
ZHOU Peng-sheng, ZHOU Ai-bao. THOG Inferences Influence Factors of Eye Movement Research[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2011, 33(2): 167-172.
- [19] 戴斌荣, 阴国恩, 俞国良. 材料呈现方式、维度数量对小学生分类活动影响的眼动研究[J]. 心理科学, 2007(4): 820-823.
DAI Bin-rong, YIN Guo-en, YU Guo-liang. Eye Movement Research on the Influence of Material Presentation Mode and Dimension Quantity on Classification Activities of Primary School Students[J]. Psychological Science, 2007(4): 820-823.
- [20] 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[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(5): 807-814.
WU Xiao-li, XUE Cheng-qi, TOM G, et al. Visual Search Experiment of Information Features in the Interface of Digital Monitoring Task[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2018, 48(5): 807-814.
- [21] 吴晓莉, TOM G, 薛澄岐, 等. 影响信息特征搜索的凝视/扫视指标与瞳孔变化幅度一致性效应比较[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(9): 1636-1644.
WU Xiao-li, TOM G, XUE Cheng-qi, et al. Comparison of the Consistent Effect of Gaze/Saccade Indexes Influencing Information Feature Search and Pupillary Variation Amplitude[J]. Journal of Computer-Aided Design and Graphics, 2019, 31(9): 1636-1644.