

矿山瓦斯监控界面多目标视觉告警编码形式研究

邵将¹, 刘珂¹, 白雨鑫¹, 罗靖², 田方圆³, 张滢¹

(1.中国矿业大学, 徐州 221116; 2.中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400050;
3.西安科技大学, 西安 710054)

摘要: **目的** 探究矿山瓦斯监控界面多个目标同时告警时的最优视觉告警编码形式。**方法** 以矿山瓦斯监控系统为研究背景, 选取颜色、大小、字符三种视觉编码形式对注意、警告、危险三种告警等级进行单目标和双目标的视觉搜索实验。**结果** 通过对正确率、反应时间以及主观评分的分析发现, 无论是单目标还是双目标视觉搜索实验, 当界面视觉告警形式采用颜色编码时, 搜索绩效最优; 相比于采用字符编码, 采用大小编码时的搜索时间更短, 但其正确率却稍低。实验结果还发现在双目标视觉搜索实验中, 告警等级的异同对反应时间具有显著性影响, 告警等级相同的比告警等级不同的两目标搜索时间更短, 且搜索过程中第二个目标比第一个目标更容易被发现。**结论** 研究结果对于提高矿山瓦斯监控系统界面的安全性, 减少监控人员的认知决策失误具有重要意义, 同时也对其他监控界面中多目标视觉告警形式的设计具有一定的指导价值。

关键词: 瓦斯监控界面; 多目标; 视觉搜索; 视觉编码

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)04-0052-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.04.006

Multiple-Target Visual Warning Coding Forms of Mine Gas Monitoring Interface

SHAO Jiang¹, LIU Ke¹, BAI Yu-xin¹, LUO Jing², TIAN Fang-yuan³, ZHANG Ying¹

(1. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400050, China; 3. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

ABSTRACT: In order to explore the optimal visual warning coding form when multiple targets alarm at the same time on the mine gas monitoring interface, the paper adopted three visual coding forms of color, size and character to conducted single target and double target visual search experiments for three alarm levels of attention, warning and danger based on the mine gas monitoring system. Through the analysis of the accuracy, response time and subjective score, the results show that whether it is a single-target or dual-target visual search experiment, the search performance is optimal when the interface adopts the color-coded visual warning form. Compared with character encoding, the search time is shorter with size encoding, but the accuracy is lower. The experimental results also find that in the dual-target visual search experiment, the similarities of alarm levels have significant effect on response time. The response time of two targets with the same alarm level is shorter than that of two targets with different alarm level, and the second target is easier to be found during the search process. The results of this study are of great significance to improve the security of the mine gas monitoring interface and reduce the cognitive decision-making errors of monitoring personnel, and also have certain guiding value for the design of multiple-target visual warning forms in other monitoring interfaces.

KEY WORDS: gas monitoring interface; multiple-target; visual search; visual encoding

收稿日期: 2021-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72001202); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (SJCX21-0977); 中国矿业大学未来杰出人才助力计划资助项目 (2021WLJCRCZL173); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2020QN17); 工效学会—津发科技优秀青年学者联合研究基金项目 (CES-Kingfar-2019-004)

作者简介: 邵将 (1988—), 男, 江苏人, 博士, 中国矿业大学副教授, 主要研究方向为脑—机接口、智能交互设计、产品数字化设计。

瓦斯煤尘一直是煤矿安全生产的“第一杀手”，在各类煤矿事故中，瓦斯事故尤为严重，死亡人数高达 90%，严重威胁矿工的生命安全以及中国煤矿的安全生产。随着我国信息化技术的快速发展，数字化的信息显示界面已经逐步取代传统的模拟控制界面，在瓦斯监控系统中发挥着重要作用，它已成为监控作业人员监测矿山瓦斯浓度信息以及判断决策的重要依据。在整个瓦斯监控界面中，告警信息的设计尤为重要，先前已有研究表明，设计不当的告警信息是导致许多事故升级的一个重要因素，只有保证系统中告警信息设计的合理性，才能使监控作业人员快速准确地对系统状态做出反应，避免事故的发生。

1 研究现状

目前，国内外学者通过颜色、亮度、闪烁、大小、位置或形状等特征对界面中的视觉信息进行编码，对告警信息的识别性能展开了大量研究。如 Lin 等人^[1]发现告警界面中警告出现的位置会影响其加工过程；Jin^[2]和 Lee 等人^[3]提出警告图标在信息处理过程中可以获得优先权；张慧姝等人^[4]通过对飞机座舱显示界面目标图符的设计，得出敌机最好采用红色实心的三角形，友机和僚机可采用绿色或蓝色实心的圆形，而不明飞机可采用黄色实心的方形；Niu 等人^[5]则探究了告警形势下各种信息编码如颜色、形状、闪烁频率、大小以及数字对用户认知性能的影响，结果表明视觉编码报警形式中识别性能最好的是字符，最差的是闪光频率；Shao 等人^[6]从事件相关电位脑电实验获得的行为数据和生理数据出发，比较了界面元素大小变化和颜色变化两种报警形式对用户视觉认知的影响，结果发现对于数字界面报警信息的呈现，在同一通道的现有方法中，虽然尺寸变化对人脑的激活程度较高，但是参与者对颜色变化的敏感度更高。虽然国内外学者对告警状态下不同信息编码的认知性能展开了研究，但是现有研究主要集中于单目标领域。而在实际的任务界面，如矿山瓦斯、通讯指挥、核电站等大型监控系统界面中，告警信息往往不仅只有一个，监控作业人员需要及时发现界面中的多个告警信息并尽快作出反应，这就使得多目标搜索变得尤为重要，探究多目标视觉搜索的特点对提高监控人员视觉搜索效率、减少事故发生具有重要意义。

关于多目标视觉搜索模型的研究最早可以追溯到 Morawski 等人^[7]将单目标搜索模型扩展到多个故障类型的研究实验。直到 2000 年，才有学者提出比较完整的多目标视觉搜索模型^[8]，此时的多目标视觉搜索模型仍有缺陷，其成立的条件在于每一个目标的搜索都是相互独立的，于瑞峰等人^[9]针对这一问题进行了多目标视觉搜索的目标独立性与模型研究，提出了改进的多目标随机视觉搜索绩效模型。还有部分学

者在研究中发现当人们进行多目标视觉搜索时，在找到第一个目标后，发现第二个目标的可能性会下降，起初这种现象被称为“搜索满意度”（Satisfaction of Search, SOS）^[10]，原因是人们会对最初显示的“结果”感到“满意”，后来众多专家学者对这种现象进行了研究，发现造成这种现象的原因有很多，如 Adamo 等人^[11]发现在更短的时间内搜索更容易发生 SSM 错误；Stothart 等人^[12]提出动态下的活动更容易出现 SSM 错误；还有学者指出 SSM 的出现与工作记忆有关^[13-14]，于是，这种效应被重新命名为“后续搜索错误”（Subsequent Search Misses, SSM）^[15]，由于 SSM 效应的存在，多目标视觉搜索的搜索绩效被大幅降低了。因此，关于单目标视觉搜索的研究并不适用于多目标视觉搜索领域，探究多目标视觉告警编码形式也就变得尤为必要了。

综上，本文以矿山瓦斯安全监控系统为研究背景，探究在单目标和多目标两种视觉搜索任务条件下，颜色编码、大小编码以及字符编码三种不同视觉告警编码形式在注意、警告、危险三种告警等级下的识别效率，以获得矿山瓦斯监控界面最优的视觉告警编码形式，并为复杂系统监控界面中多目标告警的视觉编码形式提供设计依据和实验支持。

2 视觉搜索实验

2.1 实验材料

在矿山瓦斯安全监控系统中，瓦斯浓度预警可分为五个级别，不同预警级别应采取不同的应急措施，瓦斯预警级别及措施见表 1^[16]。由表可知，当瓦斯浓度低于 0.7% 时监控作业人员可继续对系统进行监测，而当浓度超过 1.2% 时监控作业人员就需立即采取防范措施。因此本实验将瓦斯浓度分为监控（0%~0.7%）、注意（0.7%~1%）、警告（1%~1.2%）以及危险（>1.2%）4 个等级，监控作业人员只需对注意、警告、危险三种告警等级做出反应。

实验以监控状态下的瓦斯监测点图标为背景，将其设计为 20 pixels×20 pixels^[5]的实心圆形，颜色为黑色（0, 0, 0），以其他三种告警等级为目标进行视觉搜

表 1 瓦斯预警级别及措施
Tab.1 Gas warning levels and measures

范围	级别	措施
0.4%~0.7%	A	不会造成危害，可继续监测
0.7%~1%	B	应采取控制措施，由相关人员对系统进行功能性恢复
1%~1.2%	C	启动预警方案
1.2%~1.5%	D	会造成危害，立即采取防范措施
大于 1.5%	E	造成严重危害，果断排除危险点、重点防范

索实验。Michalski 等人^[17]发现界面元素的颜色或颜色对比对视觉有引导作用,且对于数字界面告警信息而言,红色代表危险或告急,处于最高级的优先地位;黄色反映了情况有变化或即将变化,需要操作者注意;橙色介于红色和黄色之间,表示系统处于警戒状态,面临高危风险。因此本实验将颜色编码作为实验变量之一,选取红色(255, 0, 0)、橙色(255, 128, 0)、黄色(255, 255, 0)分别代表监控界面危险、警告、注意三种告警等级。根据 Lourenco 等人^[18]的实验结论,当警告信息以尺寸编码的形式存在时,如果目标的尺寸越大,人类对目标危险性的感知程度更为明显。在针对飞机驾驶舱视觉告警信号设计规定的研究中,舒秀丽提出在进行视觉告警信息尺寸编码的设计时,大符号的编码应至少是小符号编码的 1.5 倍^[19]。因此本实验以监控状态下图标大小为基础,选择 30 pixels×30 pixels 的实心圆形图标表示注意状态;45 pixels×45 pixels 的实心圆形图标表示警告状态;67.5 pixels×67.5 pixels 的实心圆形图标表示危险状态。字符作为交互界面中是一个极其重要的组成部分,它可以传递大量细微的信息,具有较好的识别效果。由于现有的瓦斯安全监控系统界面采用字母代表不同的告警级别(如表 1),所以本实验采用 A、B、C、D 四个字母分别代表监控界面监控、注意、警告、危险四种状态,实验材料见表 2。

2.2 实验设备及被试

实验采用心理学实验开发软件 E-Prime 编写与控制,刺激呈现在惠普 21.5 英寸显示器中央,屏幕分辨率为 1920 px×1080 px,刷新率为 100 Hz。实验在中国矿业大学智能交互实验室进行,室内照明条件正常,屏幕背景为白色。实验使用电脑配套键盘,在键盘 1、2、3 的位置贴上了注意、警告、危险 3 个告警级别,让被试进行按键反应。被试为 20 名中国矿业大学在校研究生,男女各半,年龄在 22~30 岁之间,视力矫正或正常,无色盲或色弱。实验中会统计被试的相关信息,包括姓名、性别、年龄、专业等,所有被试均没有参加过类似实验的经历。

2.3 实验设计

实验采用 3×3×2 三因素被试内设计,因素一为注意、警告、危险三种告警等级;因素二为颜色、大小、字符三种视觉编码形式;因素三为单目标、双目标两种目标数量。由于 Lindberg 等人^[20]曾提出用户在视

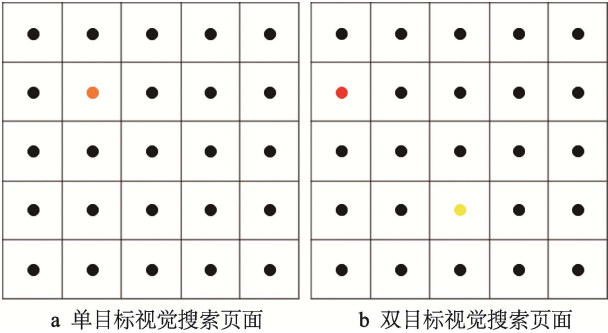


图 1 刺激呈现界面
Fig.1 The stimulus presentation interface

觉搜索的过程中偏好于 5×5 的阵列矩阵,因此本文采用 5×5 矩形阵列的方式进行实验。为消除位置效应的影响,实验过程中,目标在矩形阵列的任意一个或两个位置呈现,刺激呈现界面见图 1。实验中不告知被试界面中有几个目标将要呈现,以降低被试的心理期待。为防止被试发现视觉编码的规律,不同编码形式的目标在实验中随机呈现。整个实验中,一半是单目标搜索实验,一半是双目标搜索实验;在双目标搜索中又存在两种情况,一种是两个目标属于同一告警等级,一种是两目标属于不同告警等级。三组变量随机组合形成 36 个实验样本:18 个单目标实验,9 个双目标/相同告警等级,9 个双目标/不同告警等级。在 Eprime 平台将 36 个实验样本呈现给 20 名被试,每个实验条件呈现三次,一共 108 个试次。

2.4 实验程序

实验开始之前先让被试熟悉实验材料,了解各告警等级所对应的编码形式。随后进行练习实验,让被试熟悉不同告警等级的按键反应以及界面中出现不同数量目标时被试所需要进行的操作。练习实验程序会记录被试的正确率,当正确率大于 90%时被试才会转入正式实验。正式实验开始时,屏幕中央先呈现一个 500 ms 的红色“+”字,提醒被试注意,随后呈现刺激界面,被试需对刺激界面中出现的告警级别做出判断并进行按键反应,若告警信息为注意级,则按“注意”键;若为警告级,则按“警告”键;若为危险级,则按“危险”键。当界面中呈现两个告警信息时,被试发现第一个目标后需马上按下第一个反应键,发现第二个目标后则按下第二个反应键。当界面中只呈现一个告警信息时,被试按下第一个反应键后,确定界面中没有其他目标时,则按“空格”键结束此次搜索。虽然按键反应没有时间限制,但是要求被试集中注意力做出又好又快的反应。刺激界面结束后,屏幕呈现一个 1000 ms 的空屏,为被试提供一个缓冲。整个实验流程见图 2。

实验结束后,被试需填写一份李克特五级量表,对不同视觉告警编码形式的反应速度和辨认难度进行主观评分,并对评分的结果进行简略的说明。

表 2 实验材料
Tab.2 The experimental materials

编码形式	告警等级			
	监控	注意	警告	危险
颜色编码	●	●	●	●
大小编码	●	●	●	●
字符编码	A	B	C	D

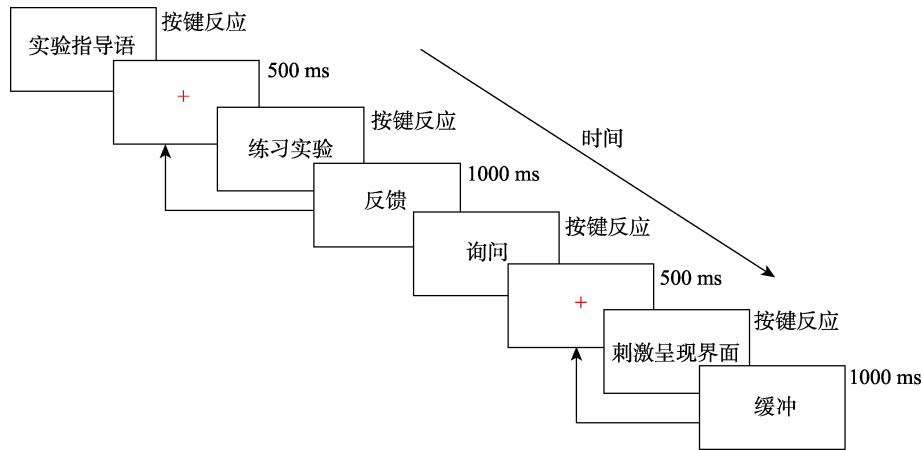


图 2 实验流程
Fig.2 The experimental flow

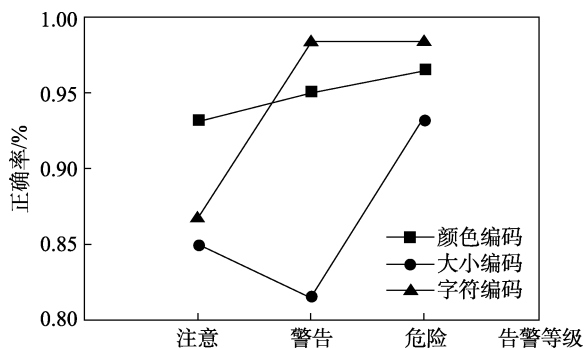


图 3 单目标不同告警等级下各编码形式的正确率
Fig.3 The accuracy of each coding form under different alarm levels of single target

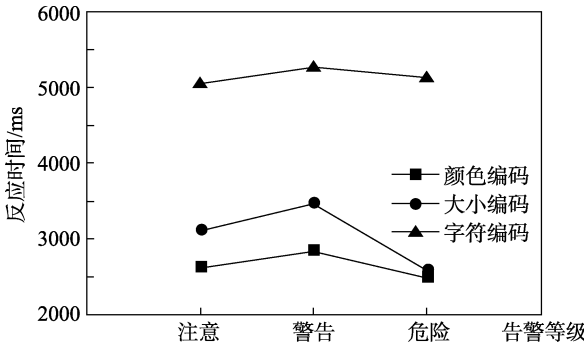


图 4 单目标不同告警等级下各编码形式的反应时
Fig.4 The response time of each coding form under different alarm levels of single target

3 实验结果与分析

剔除实验中的极端数据，采用 SPSS26.0 软件对不同实验条件下 E-prime 软件自动收集的正确率和反应时进行分析，实验设定的显著性水平值 $P=0.05$ 。首先探讨目标数量对正确率和反应时的影响，分别对两者进行配对样本 T 检验，结果表明，目标数量对正确率没有显著性影响 ($F=0.063$, $P=0.091>0.05$)，但对反应时的影响具有显著性 ($F=570.820$, $P=0.00<0.05$)，即界面中存在单目标还是双目标会明显影响被试的

反应速度。分别对单目标、双目标视觉搜索实验的数据进行分析，结果如下。

3.1 单目标视觉搜索实验

对 20 名被试在单目标条件下不同视觉告警等级以及编码形式的正确率和反应时进行统计分析，单目标不同告警等级下各编码形式的正确率见图 3，单目标不同告警等级下各编码形式的反应时见图 4。

以告警等级和编码形式两因素为变量因素，对反应时和正确率进行重复测量方差分析，结果表明，不同告警等级对正确率没有显著性影响 ($F=3.083$, $P=0.057>0.05$)，但对反应时的影响具有显著性 ($F=4.225$, $P=0.022<0.05$)；不同视觉编码形式对正确率和反应时均具有显著性影响 (正确率 $F=3.697$, $P=0.034<0.05$ ；反应时 $F=76.052$, $P=0.000<0.05$)；告警等级与编码形式之间的交互效应在正确率和反应时上均不显著 (正确率 $F=1.268$, $P=0.292>0.05$ ；反应时 $F=1.740$, $P=0.150>0.05$)。由此可见，监控作业人员对不同告警级别的反应速度具有显著性差异，不同编码形式也会显著影响监控作业人员的搜索绩效。

进一步采用最小显著性差异法对不同告警等级之间的反应时进行多重比较检验，单目标不同告警等级反应时的 LSD 检验见表 3。告警级与危险级之间具有显著性差异，而注意级与告警级、注意级与危险级之间均无显著性差异。结合图 4 可知，被试对危险级反应最快，注意级次之，警告级最慢。

对不同编码形式的反应时和正确率进行多重比较检验，结果表明大小编码与颜色编码、字符编码在反应时和正确率上均有显著性差异，颜色编码与字符编码在反应时上有显著性差异，而在正确率上两者之间的差异性不显著，单目标不同视觉告警编码形式的 LSD 检验见表 4。结合图 3、图 4 可知，当界面中只有单目标告警时，告警信息采用颜色编码时整体的认知绩效最好，采用大小编码时准确率最低，而采用字符编码时被试的反应最慢但其正确率稍高于大小编码。

表 3 单目标不同告警等级反应时的 LSD 检验
Tab.3 LSD test for different alarm levels of single target

告警等级(I)	告警等级(J)	平均误差(I-J)	标准误差	显著性
1	2	-242.094	192.833	0.225
	3	215.400	122.206	0.094
2	1	242.094	192.833	0.225
	3	457.494*	149.218	0.006
3	1	-215.400	122.206	0.094
	2	-457.494*	149.218	0.006

注：*表示平均值差值的显著性水平为 0.05；1—注意级，2—警告级，3—危险级

表 4 单目标不同视觉告警编码形式的 LSD 检验
Tab.4 LSD test for different visual warning coding forms of single target

评价指标	编码形式(I)	编码形式(J)	平均误差(I-J)	标准误差	显著性
正确率	1	2	0.083*	0.039	0.047
		3	0.006	0.025	0.820
	2	1	-0.083*	0.039	0.047
		3	-0.078*	0.037	0.049
	3	1	-0.006	0.025	0.820
		2	0.078*	0.037	0.049
反应时	1	2	-412.872*	170.868	0.026
		3	-2490.506*	248.694	0.000
	2	1	412.872*	222.512	0.026
		3	-2077.633*	185.677	0.000
	3	1	2490.506*	248.694	0.000
		2	2077.633*	222.512	0.000

注：*表示平均值差值的显著性水平为 0.05；1—颜色编码，2—大小编码，3—字符编码

表 5 双目标不同视觉告警编码形式的反应时和正确率
Tab.5 The response time and accuracy of different visual alarm coding forms of dual-target

实验变量	反应时(s)		正确率	
	平均值	标准差	平均值	标准差
颜色编码	2214.203	606.644	0.967	0.046
大小编码	2559.292	880.675	0.928	0.092
字符编码	3690.353	900.386	0.947	0.071

3.2 双目标视觉搜索实验

双目标不同视觉告警编码形式的反应时和正确率见表 5。对正确率进行分析，发现被试对 3 种编码形式评判的正确率都高达 92%以上，由于大小编码的正确率最低，对其进行 SSM 效应检验^[21]，计算公式为：

$$\frac{P(A) \times SR}{P(A) \times SR + (1 - P(A))} \quad (1)$$

其中，P(A)表示探测目标 A（感兴趣目标）的单

目标概率；SR 表示转换率，即双目标搜索中搜索顺序为先 B 后 A 的两目标都被发现的概率。结果发现其期望值与单目标搜索的命中值之间无显著性差异，即文中未出现明显的 SSM 效应。

进一步对正确率进行方差分析，结果发现 3 种编码形式之间没有显著性差异（F=1.475, P=0.244>0.05）。而反应时的方差分析结果表明，3 种编码形式之间差异性显著（F=65.788, P= 0.000<0.05），即双目标搜索时，不同的编码形式对被试的反应时间有显著影响。

进一步采用最小显著性差异法对反应时进行多重比较检验，双目标不同视觉告警编码形式反应时的 LSD 检验见表 6，3 种编码形式的反应时两两之间均具有显著性差异。被试对颜色编码的反应时间最短，大小编码次之，字符编码最长。

被试的搜索时间可进一步分为第一个目标的搜索时间和第二个目标的搜索时间，通过配对样本 T 检验对两个目标的搜索时间进行比较，发现两者具有显著性差异（F=670.634, P=0.00< 0.05），即目标被发现的次序对反应时有显著影响，第二个目标的搜索时间更短。

当界面中两个目标同时告警时，会存在两目标告警级别相同和不同两种情况，对两种情况下的反应时进行配对样本 T 检验，结果显示，两个目标的告警级别是否相同对被试反应时间具有显著性影响（F=98.696, P=0.00<0.05），当两目标告警级别相同时，被试的反应时间更短。

两目标相同时不同告警等级下各编码形式的反应时见图 5。对反应时进行告警等级×编码形式的双因素重复测量方差分析，结果表明告警等级和编码形式的主效应均非常显著（告警等级 F=13.987, P= 0.000<0.05；编码形式 F=52.911, P=0.000<0.05），两者之间的交互作用也具有显著性（F=2.644, P=0.040< 0.05）。

采用最小显著性差异法对不同告警等级的反应时进行多重比较检验，两目标相同时不同告警等级反应时的 LSD 检验见表 7。危险级与注意级、警告级之间均存在显著性差异，注意级与警告级间差异性不

表 6 双目标不同视觉告警编码形式反应时的 LSD 检验
Tab.6 LSD test for different visual warning coding forms of dual-target

编码形式(I)	编码形式(J)	平均误差(I-J)	标准误差	显著性
1	2	-345.089*	135.765	0.020
	3	-1476.150*	135.017	0.000
2	1	345.089*	135.765	0.020
	3	-1131.061*	133.102	0.000
3	1	1476.150*	135.017	0.000
	2	1131.061*	133.102	0.000

注：*表示平均值差值的显著性水平为 0.05；1—颜色编码，2—大小编码，3—字符编码

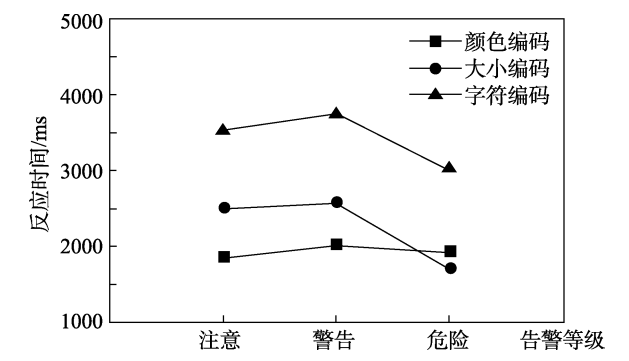


图 5 两目标相同时不同告警等级下各编码形式的反应时
Fig.5 The response time of each coding form under different alarm levels when two targets are the same

表 7 两目标相同时不同告警等级反应时的 LSD 检验
Tab.7 LSD test for different alarm levels of single target when two targets are the same

告警等级 (I)	告警等级 (J)	平均误差 (I-J)	标准 误差	显著性
1	2	-157.222	101.490	0.138
	3	386.494*	112.277	0.003
2	1	157.222	101.490	0.138
	3	543.717*	103.327	0.000
3	1	-386.494*	112.277	0.003
	2	-543.717*	103.327	0.000

注：*表示平均值差值的显著性水平为 0.05；1—注意级，2—警告级，3—危险级

显著。结合图 5 可知，被试对危险级反应最快，对警告级反应最慢。对不同编码形式的多重比较检验结果表明，三种编码形式两两之间均存在显著性差异，被试对颜色编码的视觉告警形式反应最快。

对告警等级与编码形式之间的交互作用进行简单效应检验，结果表明，当告警等级处于注意级时，三种编码形式两两之间均存在显著性差异，颜色编码的认知速度最快；当处于警告级时，字符编码与颜色编码、大小编码之间存在显著性差异，颜色编码与大小编码之间没有差异，字符编码的认知速度最慢；当处于危险级时，字符编码与颜色编码、大小编码之间均存在显著性差异，而颜色编码与大小编码之间没有差异。

两目标告警级别不同时，对反应时的重复测量分析结果表明，3 种告警编码形式之间具有显著性差异（ $F=45.729, P=0.00<0.05$ ），被试同样对颜色编码的视觉告警形式反应最快。

3.3 李克特量表评分

对三种编码形式的反应速度和辨认难度的主观评分进行分析，不同编码形式的主观评分见表 8。

对三种编码形式主观得分的方差分析结果表明，不同编码形式的反应速度和辨认难度的评分之间均具有显著性差异（反应速度 $F=13.400, P=0.00<0.05$ ；

表 8 不同编码形式的主观评分
Tab.8 Subjective scores of different coding forms

实验变量	反应迅速		容易辨认	
	平均值	标准差	平均值	标准差
颜色编码	4.500	0.607	4.550	0.605
大小编码	3.350	0.813	3.100	0.912
字符编码	3.250	1.118	3.400	0.995

辨认难度 $F=17.190, P=0.000<0.05$ ），即被试认为不同编码形式对告警信息的搜索绩效具有显著性影响，这与行为实验的结论一致，结合表 8 可知，被试认为颜色编码的认知绩效最优。

4 讨论

研究发现，在视觉搜索中，目标数量会对搜索绩效产生显著性影响，搜索单目标的用时比搜索双目标用时长。推测这是由于在实验开始之前，主试已经告诉被试实验过程中会有一个或两个目标出现，被试已经预测到了第二个目标的存在，所以即使当界面中只有一个目标时，被试也会对所有的目标进行搜索，当确定界面中不存在第二个目标后才会进行按键反应；而当界面中有两个目标存在时，被试找到第二个目标后就会立即进行按键反应，从而缩短了搜索时间，这一结果与先前的研究结果一致^[22]，Höfler 等人^[23]通过模拟日常视觉搜索实验也证实了相比两个或没有目标存在的情况，当只有一个目标存在时，搜索持续时间更长。

在视觉搜索中，颜色作为一种容易被注意到的独特特征，会明显吸引人的注视。研究发现，无论是单目标还是双目标视觉搜索实验，颜色编码的正确率和反应时均要显著优于大小编码和字符编码，被试的主观评分也凸显了颜色编码的优越性。王海燕等人^[24]也提出颜色的视觉敏感度要高于替他特征，一些研究也表明颜色可以显著促进界面视觉元素的搜索绩效^[25-26]。对于大小编码和字符编码，在正确率上，后者优于前者，通过被试说明可知这主要是因为采用字符编码时被试可轻易分辨不同的告警等级，而采用大小编码时不同告警等级间的尺度差异较小，被试在识别过程中易误读、误判，因此其正确率低于字符编码。但在反应时上，大小编码要显著优于字符编码。根据刺激相似性理论，视觉搜索的难度往往在于目标与干扰物之间的相似程度^[27]，当干扰物在视觉上与目标相似时，它们更容易分散注意力^[28]。在本研究中字符编码的目标与干扰物（即背景）之间的相似度要远远大于大小编码之间的相似度，其干扰性大大降低了视觉搜索绩效，因此大小编码的反应时低于字符编码。本实验的研究结果与张馨予之前的研究有些许出入，他以雷达作战系统界面为背景，通过实验得出在单维信息编码下，颜色编码的正确率优于字符编码和大小编码，而

字符编码的反应速度快于颜色编码和大小编码^[29]。推测本研究中字符编码反应最慢的原因是实验过程中,被试需对 B、C、D 作出对应告警等级的反应,而对监控状态(即 A)不作反应,这与普通人的认知习惯有些出入,且实验开始之前,主试告知被试需作出又准又快的判断,被试为确保正确率在按键之前还需对不同等级进行再思考,因此反应速度较慢。

纵观单目标和双目标不同告警等级的数据分析结果发现,被试对危险级反应最快,注意级次之,警告级最慢,如图 4—5。根据“干扰抑制说”理论,人在记忆的过程中会受到“前摄抑制”和“后摄抑制”的影响,对记忆中的内容产生遗忘,而中间的内容受到双重抑制的干扰,更容易被遗忘,因此被试对警告级反应最慢。且本实验中对危险级的设计采用红色、大尺寸以及 D 级,相较于黄色、小尺寸以及 B 级,更容易使人在视觉搜索过程中产生紧张感和压迫感,因此反应较快。

在双目标视觉搜索中本文未出现明显的 SSM 效应,推测是由于实验中最多要求被试对两个目标进行搜索,目标数量较少且难度较低,所以正确率较高。同时实验结果显示,双目标视觉搜索条件下,被试对第二个目标的搜索时间要显著少于第一个目标的搜索时间,推测是由于工作记忆的影响,即当被试搜索到第一个目标时,看到了第二个目标或者将目光停留在了第二个目标附近,从而提高了搜索效率,缩短了搜索时间。

实验结果还发现当界面中出现两个告警信息时,两目标告警等级的异同对反应时的影响显著,被试对相同告警等级的目标反应更快。大部分学者认为产生这一现象的原因是人的知觉相似性理论:当第一个目标被发现后,这个目标模板可能被储存在工作记忆中,并引导对其他目标的视觉搜索,因此与感知不同的目标相比,与该模板具有感知相似性的目标更有可能被找到。Berbaum 等人^[30]就曾指出在多目标搜索过程中,当一个目标被发现时,搜索者接下来更可能识别出与被发现目标在感知上相似的其他目标;Gorbunova 等人^[31]也发现随着目标相同特征的增加,被试在找到第一个目标后,找到第二个目标的时间越来越少。这些研究均表明,目标物之间的相似性会大大影响视觉搜索的效率。但也有部分学者提出被试可以更快找到同等级的目标是由于其概念上的相似性,当告警目标处于相同等级时,被试只需要对信息进行一次加工而不需要消耗其他的认知资源对信息进行再加工,从而大大提高了视觉搜索效率。Biggs 等人^[32]的研究也说明了这一点,该研究要求游戏玩家在包里寻找(零个、一个、两个或三个)危险物品,危险物品分为两类:与枪支有关的物品或与爆炸物有关的物品。结果表明,当第二个目标来自一个不同的类别时,发现它的概率远远大于来自不同类别的两目

标。推测本文中被试对同等级目标反应更快是由于知觉相似性理论和概念相似性理论的共同作用,但目前还没有明确的证据可证明这一观点,后续还需进一步的研究。

5 结语

综合单双目标视觉搜索实验的结果,对于矿山瓦斯监控界面,当采用颜色编码的视觉告警形式时,被试的搜索绩效最优,因此在设计实际的告警信息时,可优先考虑颜色编码的视觉告警形式;同时实验结果也显示界面中背景与目标之间的相似程度会显著影响视觉搜索绩效,因此在设计过程中,应考虑告警形式与背景之间的差异度,突出设计的重点。在双目标视觉搜索中,虽然未出现明显的 SSM 效应,但本文也发现了一些多目标视觉搜索的特点。比如相比单目标视觉搜索,被试在进行多目标视觉搜索时用时更短,且被试找到第二个目标的时间显著小于找到第一个目标的时间。此外,当界面中两目标相同时,其搜索时间显著小于两目标不同时的搜索时间,这也给告警信息的设计提供了一些思路:设计时可考虑适当增加信息元素间的相似性以减少视觉搜索的时间,提高搜索绩效。

综上,本文在矿山瓦斯监控系统的基础上对视觉告警编码形式展开了研究,揭示了多目标告警时视觉编码的基本规律和特征,对提高监控作业人员的搜索绩效、减少矿山瓦斯事故的发生具有重要意义。但同时本文的研究也存在一定的局限性,如实验中未考虑其他如声音、动画等辅助告警形式,仅对视觉告警的编码形式进行了研究,今后也将进一步结合多通道告警的形式,深入探索不同目标数量下安全监控系统界面的告警方式。

参考文献:

- [1] LIN Y, XUE C, GUO Q, et al. The Study of Presentation Characteristics of the Warning Information and Its Influence on User's Cognitive Process Based on Eye Tracking[C]//Proceedings of International Conference on Engineering Psychology & Cognitive Ergonomics. Switzerland: Springer, Cham, 2017.
- [2] JIN T, NIU Y F, ZHANG L, et al. Are the Warning Icons More Attentional[J]. Applied Ergonomics, 2017, 65: 51-60.
- [3] LEE D A. Safe Operations Using Advanced Operator Graphics[J]. Process Safety Progress, 2020, 39(3): 1-10.
- [4] 张慧姝, 庄达民, 马丁, 等. 飞机座舱显示界面目标图符的设计和评价[J]. 包装工程, 2011, 32(10): 89-92. ZHANG Huishu, ZHUANG Damin, MA Ding, et al. Design and Evaluation of Target Icons of The Cockpit Display Interface[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(10): 89-92.

- [5] NIU N F, LI B, ZHANG X Y, et al. Performance Evaluation of Alarm Forms under Different Visual Coding on the Digital Interface[C]// Proceedings of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Singapore: IOP Publishing, 2018.
- [6] SHAO J, XUE C, WANG H, et al. Study on Event- Related Potential of Information Alarm in Monitoring Interface[C]// Proceedings of International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. Switzerland: Springer, Cham, 2015.
- [7] MORAWSKI T, DRURY C G, KARWAN M H. Predicting Search Performance for Multiple Targets[J]. Human Factors, 1980, 22(6): 707-718.
- [8] DRURY C G, HONG S. Generalizing from Single Target Search to Multiple Target Search[J]. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 2000, 1(4): 303-314.
- [9] 于瑞峰, 孔哲昕. 多目标随机视觉搜索的目标独立性及模型研究[J]. 工业工程与管理, 2013(3): 117-120.
YU Rui-feng, KONG Zhe-xin. A Study of Targets Independence and Modeling of Multiple-Target Random Visual Search[J]. Industrial Engineering and Management, 2013(3): 117-120.
- [10] SMITH M J. Error and Variation in Diagnostic Radiology[M]. Springfield, IL: Charles C Thomas, 1967.
- [11] ADAMO S H, CAIN M S, MITROFF S R. Satisfaction at Last: Evidence for The "Satisfaction" Hypothesis for Multiple-target Search Errors[J]. Visual Cognition, 2015, 23(7): 821-825.
- [12] STOTHART C, CLEMENT A, BROCKMOLE J R. Satisfaction in Motion: Subsequent Search Misses Are More Likely in Moving Search Displays[J]. Psychonomic Bulletin & Review, 2018, 25(1): 409-415.
- [13] GORBUNOVA E S, KOZLOV K S, LE S T T, et al. The Role of Working Memory in Dual-Target Visual Search[J]. Frontiers in Psychology, 2019, 10: 15.
- [14] CAIN M S, MITROFF S R. Memory for Found Targets Interferes with Subsequent Performance in Multiple-target Visual Search[J]. Journal of Experimental Psychology Human Perception & Performance, 2013, 39(5): 1398-1408.
- [15] ADAMO S H, CAIN M S, MITROFF S R. Self-Induced Attentional Blink: A Cause of Errors in Multiple-Target Search[J]. Psychological Science, 2013, 24(12): 2569-2574.
- [16] 赵鹏利. 基于 HTML5 移动开发技术的矿山安全监测系统的设计与实现[D]. 贵阳: 贵州大学计算机技术系, 2017.
ZHAO Peng-li. Design and Implementation of Mine Safety Monitoring System Based on HTML5 Mobile Development Technology[D]. Guiyang: Department of Computer Technology, Guizhou University, 2017.
- [17] MICHALSKI R. The Influence of Color Grouping on Users' Visual Search Behavior and Preferences[J]. Displays, 2014, 35(4): 176-195.
- [18] LOURENCO S F, LONGO M R, PATHMAN T. Near Space and Its Relation to Claustrophobic Fear[J]. Cognition, 2011, 119(3): 448-453.
- [19] 舒秀丽, 董大勇, 董文俊. 飞机驾驶舱视觉告警信号设计的基本要求分析[J]. 航空工程进展, 2015, 6(4): 512-518.
- [20] SHU Xiu-li, DONG Da-yong, DONG Wen-jun. Analysis of Basic Requirement for Visual Warning Signals in Aircraft Flight Deck Design[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2015, 6(4): 512-518.
- [21] LINDBERG T, NAESAENEN R. The Effect of Icon Spacing and Size on The Speed of Icon Processing in The Human Visual System[J]. Displays, 2003, 24(3): 111-120.
- [22] BECKER M W, ANDERSON K, BRASCAMP J W. A Novel, Unbiased Approach to Evaluating Subsequent Search Misses in Dual Target Visual Search[J]. Attention Perception Psychophysics, 2020, 82: 3357-3373.
- [23] KÖRNER C, GILCHRIST I D. Memory Processes in Multiple-target Visual Search[J]. Psychological Research, 2008, 72(1): 99-105.
- [24] HÖFLER M, HÜBEL B. Missing Targets in Multiple-target Search[J]. Psychology Applications & Developments, 2018, 22: 247-256.
- [25] 王海燕, 黄雅梅, 陈默, 等. 图标视觉搜索行为的 ACT-R 认知模型分析[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(10): 1740-1749.
WANG Hai-yan, HUANG Ya-mei, CHEN Mo, et al. Analysis of Cognitive Model in Icon Search Behavior Based on ACT-R Model[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(10): 1740-1749.
- [26] 杨欢, 李义娜, 张康. 可视化设计中的色彩应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(9): 1587-1596.
YANG Huan, LI Yi-na, ZHANG Kang. Proper Use of Color in Visualization[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(9): 1587-1596.
- [27] ADNAN M, JUST M, BAILLIE L. Investigating Time Series Visualisations to Improve The User Experience[C]//Proceedings of 34th annual Chi Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: Assoc Computing Machinery, 2016.
- [28] DUNCAN J, HUMPHREYS G W. Visual Search and Stimulus Similarity[J]. Psychological Review, 1989, 96(3): 433.
- [29] GODWIN H, HOUT M, MENNEER T. Visual Similarity is Stronger than Semantic Similarity in Guiding Visual Search for Numbers[J]. Psychonomic Bulletin & Review, 2014, 21(3): 689-695.
- [30] 张馨予. 数字界面不同视觉告警形式的工效学研究[D]. 南京: 东南大学工业设计工程系, 2018.
ZHANG Xin-yu. Ergonomics Research of Different Visual Alarm Forms on The Digital Interface[D]. Nanjing: Department of Industrial Design Engineering, Southeast University, 2015.
- [31] BERBAUM K S, FRANKEN E A, DORFMAN D D, et al. Time Course of Satisfaction of Search[J]. Investigative Radiology, 1991, 26(7): 640-648.
- [32] GORBUNOVA, ELENA S. Perceptual Similarity in Visual Search for Multiple Targets[J]. Acta Psychologica, 2017, 173: 46-54.
- [33] ADAM T, BIGGS, et al. Examining Perceptual and Conceptual Set Biases in Multiple-target Visual Search[J]. Attention Perception Psychophysics, 2015, 77: 844-855.