

雾气下心电监护仪界面视觉搜索效率研究

池宁骏, 张凯旋*

(西安科技大学, 西安 710600)

摘要: **目的** 研究护目镜产生雾气情况下心电监护仪界面的字符大小及颜色一致性对信息视觉搜索效率的影响。**方法** 通过模拟护目镜在不同雾气程度下的场景, 控制不同字符大小、颜色一致性, 考察三者对医护人员视觉搜索效率的影响。实验中 37 位被试依次完成眼动实验, 记录其行为数据和眼动数据, 深入探讨三种变量因素的交互效应。**结果** 使用心电监护仪时不同雾气程度、字符大小、颜色一致性三种因素的交互效应显著, 其中行为数据的三种因素交互效应显著 $P < 0.001$, 眼动数据的三种因素交互效应显著 $P < 0.05$ 。未产生雾气与低雾气场景下, 大字符、颜色不一致视觉搜索效率最高; 中雾气与高雾气场景下, 中字符、颜色不一致的视觉搜索效率最高。**结论** 三种因素在不同条件下, 交互效应的视觉搜索效率不同, 设计人员可根据护目镜产生的雾气程度, 调整心电监护仪界面字符大小与颜色一致性, 以提升医护人员的视觉搜索效率。

关键词: 人机交互; 视觉搜索效率; 眼动实验; 界面优化; 心电监护仪

中图分类号: TB472 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)04-0271-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.04.029

Visual Search Efficiency of ECG Monitor Interface under Fog

CHI Ningjun, ZHANG Kaixuan*

(Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710600, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the effect of character size and colour consistency on the visual search efficiency of information in the ECG monitor interface in the presence of fog on the goggles. By simulating the scenario of the goggles under different fog levels and controlling different character sizes and color consistency, the effect of the three factors on the visual search efficiency of the health care workers was examined. In the experiment, 37 subjects completed the eye movement experiment successively, and their behavior and eye-movement data were recorded to explore the interaction effect of the three variables in depth. The results of the study found a significant interaction effect among the three factors of different fog levels, character size and colour consistency when the ECG monitor was used, with a significant $P < 0.001$ interaction of the three factors for the behavior data and a significant $P < 0.05$ interaction of the three factors for the eye movement data. Under no fog and low fog, the visual search efficiency of large character and color inconsistency was the highest. Under medium fog and high fog, the visual search efficiency of medium character and color inconsistency was the highest. The visual search efficiency of the interaction effect differs under different conditions of the three factors. Designers can adjust the character size and color consistency of the ECG monitor interface according to the level of fog generated on the goggles to improve the visual search efficiency of the health care workers.

KEY WORDS: human-computer interaction; visual search efficiency; eye movement experiment; interface optimization; ECG monitor

心电监护仪, 是用来记录心脏活动时所产生的, 生理电信号的临床检查常见仪器, 通常用途包括: 心律失常和传导障碍的诊断; 跟踪心血管健康; 评估心

肌梗死的病变期部位、范围, 以及演变过程。心电监护现已广泛应用于各种临床应用中^[1]。在传染病的救治时, 医护人员在急救手术的过程中需要全程佩戴口

罩和护目镜以避免感染。护目镜产生雾气使得医护人员识别效率下降,引起视觉疲劳或者误判等风险^[2-3],从而导致医护人员无法迅速搜寻到心电监护仪上的重要生命体征信息,错失抢救患者的最佳时机。医护人员使用心电监护仪观测生命体征时,对特定界面进行搜索的认知过程被称为视觉搜索^[4],视觉搜索贯穿于人们的日常行为之中,是人们获得外界信息并进行信息处理的一种重要方式,在大量专门化工作中起着决定性作用。

1 提出问题

在人机界面交互时,缩短搜索时间就代表着视觉搜索效率的提高,这将增强用户体验感^[5]。现阶段各学者对界面的物理特征做出研究并表明界面的物理属性会影响视觉搜索效率。宫殿坤等^[6]提出宋体搜索效率高于楷体;方浩等^[7]提出文字细体视觉搜索效率高于粗体;常方圆^[8]提出在手机界面图标应用中蓝色视觉搜索效率优于橘色;Näsänen 等^[9]提出图标对比度与清晰度逐步增加后的视觉搜索效率更高;Huang 等^[10]提出在图标颜色与背景颜色对比关系中,黑/蓝与黑/黄的视觉搜索效率高于白/黄与白/蓝,除此之外图标的动态性^[11-13]、字符大小及密度^[14-15]都会对视觉搜索效率有不同的影响。也有学者研究了在视觉识别不清晰时的视觉搜索效率影响,如浓雾中驾驶的情况。研究发现,具有特定光谱的光线可以更好地穿透浓雾。紫色和蓝色波长范围较短,穿透力弱;而红色波长范围较长,穿透力强^[16-17]。除了对颜色属性的研究,有学者还提出能见度与距离也会对驾驶人员的视觉和心理产生影响。研究表明,识别距离随能见度的降低而降低,对距离判断误差也逐步增大^[18]。

在医疗仪器的界面优化探索中,Yao 等^[19]考察了手持温度计信息界面的字体倾斜度、屏幕亮度及环境照度对信息识别的影响。结果表明,字体的倾斜角度为 20° (向右)时,反应时间最快,识别效率最高;字体的倾斜角度为 -10° (向左)时,反应时间最慢,识别效率最低。从环境照度影响分析,当环境照度为 50 lx 时,反应时间最快,随着环境照度的不断提高,手持式温度计界面的识别效率会逐渐下降。该研究为相关界面的开发设计提供了理论指导和参考。Ren 等^[20]通过对心电图机的界面和可读性进行模糊仿真,对界面中数字字体的目标识别进行了实验研究,考察了护目镜的雾化程度、字体颜色及屏幕亮度的相互作用对信息识别的影响。结果表明,在中等亮度(150 cd/m^2)的屏幕下,被试有较好的视觉表现,识别界面中数字字体的效率最高。在颜色变化方面,黄色和绿色字体的整体识别效率相对较高,但错误率波动也很大,在中等亮度(150 cd/m^2)的屏幕下绿色字体比黄色和蓝色字体的识别效率更高,为心电信号接口的界面优化提供了理论依据。

综上所述,界面的字符大小、字符倾斜程度、图标颜色、屏幕的亮度等物理属性的相互组织形式均会影响视觉搜索效率,颜色和字符作为界面设计的重要因素,不仅是人机交互界面设计中必不可少的因素,也是众多研究者关注的重点。但先前针对医疗仪器界面优化的研究,主要集中在字符间距和倾斜度、屏幕亮度、环境照度,以及颜色等因素的探讨上。实际上,还没有研究考察护目镜产生雾气时字符大小及颜色一致性之间的交互效应。本文在分析了大量人机交互界面中颜色、字符等因素构成特征的基础上,参考先前医疗仪器界面优化设计的研究,以心电监护仪界面为例,利用眼动追踪技术构建模拟实验,达到更加精确、客观地记录与观察的效果,重点考察护目镜在不同雾气程度下,心电监护仪界面字符大小及颜色一致性对医护人员视觉搜索效率的影响,为现有医疗仪器界面优化提供改良意见。同时提供定量的实验数据支持并提出有效参考标准,也为以后医疗仪器界面的设计提供参考,以减少紧急环境下医护人员使用医疗仪器的医疗失误。

2 实验设计

2.1 实验被试

招募参与者50位并选择符合要求的37位作为实验对象,其中校医护人员7位,相关医学专业研究生5位,设计学相关专业研究生25位。男性20名,女性17名,校医护人员平均年龄为 $32\sim 48$ 岁,研究生群体年龄为 $23\sim 26$ 岁。实验对象均满足不斜视、不散光、无色弱色盲的生理条件,且实验时需满足不戴美瞳、裸眼或戴眼镜情况下视力不低于5.0的条件,被试完成实验后将获得一定报酬。

2.2 实验材料

实验材料以可孚品牌心电监护仪界面区域作为AOI兴趣区(实验材料中画出包含实验关键对象的区域),探讨在不同雾气程度下字符大小、颜色一致性的视觉搜索效率。将心电监护仪 $320\text{ px}\times 240\text{ px}$ 的界面有效信息在白色背景上呈现,并显示在S2421HSX的戴尔23.8英寸(1英寸 $=2.54\text{ cm}$)显示器上。

1) 自变量 1: 尽管较多研究表明字符细体的视觉搜索效率高于粗体,但心电监护仪中常用文字仍为粗体,本研究依旧采用粗体进行实验,将心电监护仪界面中代表生命体征(心率、血压、血氧、呼吸率、体温)数值的字符大小按照特征梯度分类^[21],以 10 pt 为1个梯度,其中 $30\sim 90\text{ pt}$ 为合理,低于合理区间会看不清内容,高于合理区间则会产生界面负担。为更加明显表达字符大小,将字符分为小字符(30 pt)、中字符(60 pt)、大字符(90 pt)3种不同大小。图示字符大小以心率数值为例,如图1~3所示。



图 1 小字符（30 pt）
Fig.1 Small character (30 pt)



图 2 中字符（60 pt）
Fig.2 Medium character (60 pt)



图 3 大字符（90 pt）
Fig.3 Large character (90 pt)

2) 自变量 2: 实验时心电监护仪界面的图标颜色采用心电监护仪界面中常用的绿色 ($R: 0; G: 255; B: 0$)、蓝色 ($R: 0; G: 0; B: 255$)、红色 ($R: 255; G: 0; B: 0$)、黄色 ($R: 255; G: 255; B: 0$)、白色 ($R: 255; G: 255; B: 255$), 配以与图标颜色一致和不一致的数值颜色, 为使实验具有更好的代表性和均衡性, 需避免主观意识对颜色不一致的干涉, 将不一致颜色设置为常用 5 种颜色的随机颜色, 且每个被试观看的不一致颜色都是同一样本。图标与数值颜色一致性以心率图标与数值为例, 如图 4~5 所示。

3) 环境变量: 为接近医护人员佩戴护目镜产生雾气的真实情况, 将 1:1 大小的心电监护仪界面居中显示在显示器上, 并在三维软件中还原实验场景, 测出实验场景的关键尺寸。在距离显示器正面 6 cm 的位置放置不同透光程度的玻璃板(通过计算得出显示屏到磨砂玻璃板之间的最大距离为 12 cm, 距离超出 12 cm 后, 磨砂玻璃板会挡住眼动仪采集被试的眼动数据)。模拟护目镜产生雾气的三种程度, 分别为: 低雾气 (10%~40%)、中雾气 (40%~70%)、高雾气 (70%~100%), 并以一款未产生雾气的常规医用护目镜作为参考。实验过程中模拟不同雾气程度下观测心电监护仪界面如图 6~9 所示。

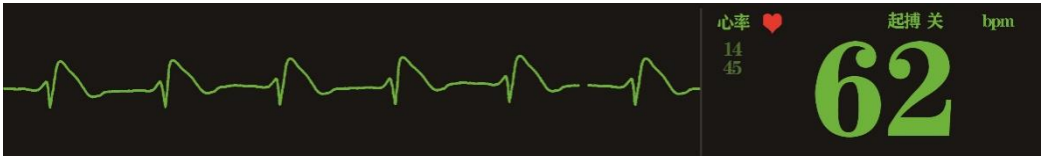


图 4 图标与数值颜色一致
Fig.4 Consistency between icon and numeric color

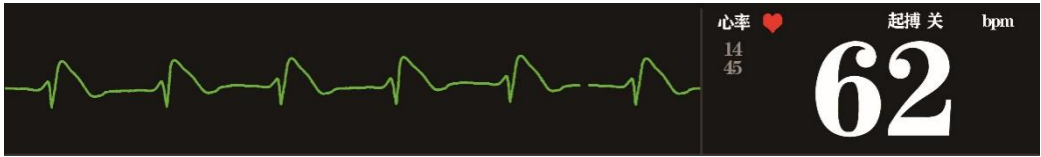


图 5 图标与数值颜色不一致
Fig.5 Inconsistency between icon and numeric color



图 6 未产生雾气的心电监护仪界面
Fig.6 ECG monitor interface in environment without fog



图 7 低雾气环境下心电监护仪界面
Fig.7 ECG monitor interface in low fog environment

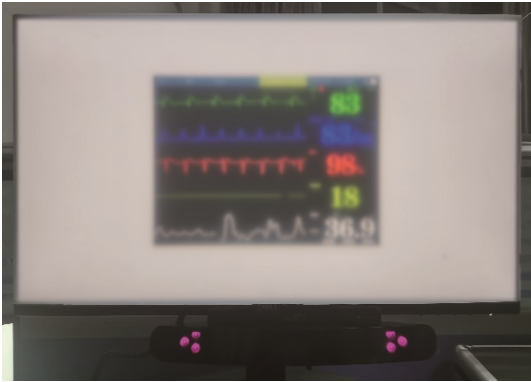


图 8 中雾气环境下心电监护仪界面
Fig.8 ECG monitor interface in medium fog environment



图 9 高雾气环境下心电监护仪界面
Fig.9 ECG monitor interface in high fog environment

2.3 实验设计

本次实验采用 4（不同雾气程度）×3（界面字符大小）×2（界面图标与数值颜色是否一致）的 3 因素被试内实验设计。雾气程度分为未产生雾气、低雾气、中雾气、高雾气 4 种水平；字符分为小字符、中字符、大字符 3 种水平；图标与数值颜色分为一致和不一致 2 种水平。研究被试在观测不同雾气程度时心电监护仪界面信息搜索过程中的行为数据、眼动追踪情况。为了增加实验过程中的随机性，其中心电监护仪的数值正常范围与不正常范围的比例为 8：2，每个被试完成 5 组实验，其中包括 1 组练习实验，4 组正式实验，正式实验共观测 24 种条件下心电监护仪界面。

因变量：采用行为数据（初次点击时间）和眼动数据（总注视时间、注视点数量）作为指标考察“视觉搜索效率”，具体如下。

- 1）初次点击时间，指被试从任务开始到发现目标并单击的时间，时间越短视觉搜索效率越高。
- 2）总注视时间，指 AOI 兴趣区内的所有注视时间的总和，主要受认知因素的制约，注视时间越短，认知加工负荷越低，目标视觉搜索效率越高。
- 3）注视点数量，指被试对 AOI 兴趣区内注视点数量，注视点越少则被试的眼跳次数更少，对目标越确定，目标视觉搜索效率越高。

2.4 实验仪器

本实验在采用 aSee Pro F100 桌面式眼动仪与 aseestudio 分析软件的基础上利用角膜反射法，并使用暗瞳追踪技术记录被试的眼动轨迹，采用 9 点校准法校准，取样速率达到 100 Hz，被试在 55~80 cm 内观测显示在分辨率为 1 920 px × 1 080 px 屏幕上的实验材料，实验过程中被试双眼数据采集正常，确保数据准确。

2.5 实验流程

实验以单个对象测试的方法展开，被试依次进入实验室，实验过程保持安静，步骤如下。

1）在实验开始之前测试员对被试进行眼动相关课程培训，令其掌握一定的眼动知识，并介绍心电监护仪的数据含义，使被试达到较高的配合度与对实验的理解度。

2）进入实验区域，为避免光线对实验的影响，采用国际医院病房照明标准 100 lx 并以地面为参照标准。

3）提前导入实验材料，保证实验器材正常工作。

4）帮助被试进行设备校准，并调整座椅高度和距离。

5）被试按照实验要求，在完成 1 组测试实验并休息 1 min 后开始正式实验，观测心电监护仪的心率图标与数值，观测完成后点击鼠标右键。接着完成心电监护仪上所有图标与数值的观测，完成后点击左键进入下一张测试。

在完成一种环境变量下观测字体大小与颜色一致性的实验后，更换模拟环境的不同透光程度玻璃板，重新校准再实验，实验过程如图 10 所示。

3 实验结果

实验结果包括行为数据（初次点击时间）和眼动数据（总注视时间、注视点数量）两大部分。通过多因素方差分析对雾气程度、字符大小、颜色一致性在用户视觉搜索过程中的影响进行讨论，以行为数据和眼动数据作为衡量被试视觉搜索效率的参考指标并加以分析。

3.1 初次点击时间

对初次点击时间进行多因素方差分析发现，雾气程度、字符大小、颜色一致性 3 种因素的交互效应显著 $F(6, 216) = 7.781, P < 0.001$ 。经进一步简单效应检验发现，在未产生雾气场景中，在小字符与大字符水平下，颜色不一致的视觉搜索效率显著高于颜色一致，而在中字符水平下，颜色不一致的视觉搜索效率与颜色一致无显著差异。在低雾气场景中，在小字符与大字符水平下，颜色不一致的视觉搜索效率显著高

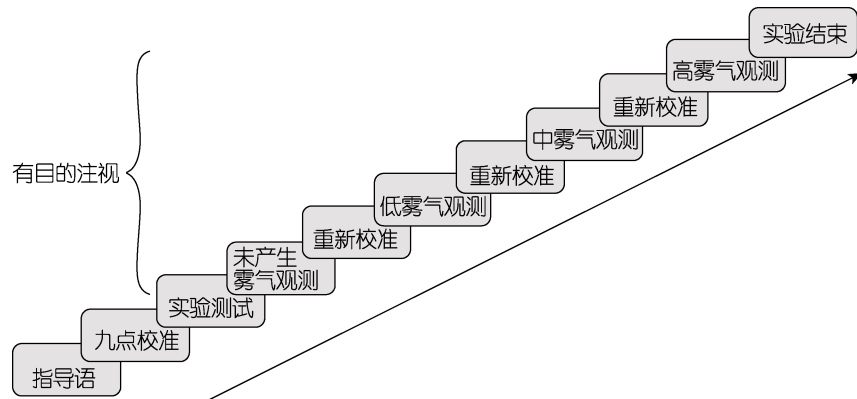


图 10 不同雾气程度下观测 24 种实验处理水平实验过程示例

Fig.10 Examples of experimental processes at 24 experimental treatment levels observed at different fog levels

于颜色一致,而在中字符水平下,颜色一致的视觉搜索效率略高于颜色不一致。在中雾气场景中,在小字符、中字符与大字符水平下,颜色不一致的视觉搜索效率均显著高于颜色一致。在高雾气场景中,在小字符与中字符水平下,颜色不一致的视觉搜索效率显著高于颜色一致,而在大字符水平下,颜色一致的视觉搜索效率显著高于颜色不一致。将所有水平下的视觉搜索效率进行比较发现,在未产生雾气场景中,大字符颜色不一致组合的初次点击时间最短,而在高雾气场景中,小字符颜色一致组合的初次点击时间最长。初次点击时间的多因素方差分析结果如表 1 所示。

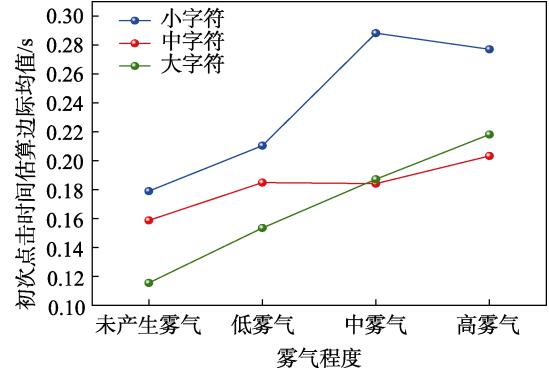


图 11 雾气程度与字符大小交互效应

Fig.11 Interaction effect between fog level and character size

表 1 初次点击时间多因素方差分析结果

Tab.1 Time to first click multivariate ANOVA results

因素名称	<i>F</i>	<i>P</i>	η^2
雾气程度	317.585	<0.001	0.524
字符大小	427.680	<0.001	0.497
颜色一致性	77.541	<0.001	0.082
雾气程度×字符大小	34.905	<0.001	0.195
雾气程度×颜色一致性	2.884	=0.035	0.010
字符大小×颜色一致性	90.500	<0.001	0.173
雾气程度×字符大小×颜色一致性	7.781	<0.001	0.051

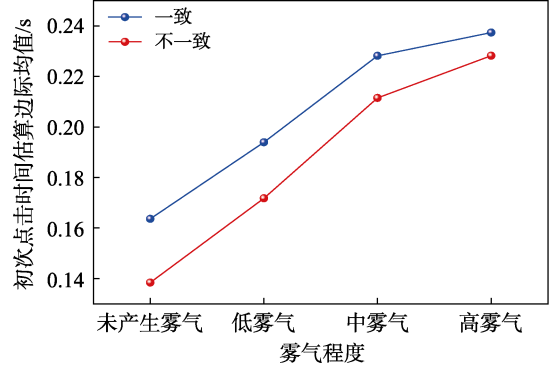


图 12 雾气程度与颜色一致性交互效应

Fig.12 Interaction effect between fog level and color consistency

雾气程度与字符大小的交互效应显著 $F(6, 216) = 34.905$, $P < 0.001$, 交互效应如图 11 所示; 雾气程度与颜色的一致性交互效应显著 $F(3, 108) = 2.884$, $P < 0.05$, 交互效应如图 12 所示; 字符大小与颜色一致性的交互效应显著 $F(2, 72) = 90.500$, $P < 0.001$, 交互效应如图 13 所示。大字符水平下, 未产生雾气的初次点击时间显著低于高雾气。小字符水平下, 中雾气的初次点击时间显著高于未产生雾气。颜色一致水平下, 高雾气的初次点击时间显著高于未产生雾气, 小字符的初次点击时间显著高于大字符。颜色不一致水平下, 未产生雾气的初次点击时间显著低于高雾气, 大字符的初次点击时间显著低于小字符。

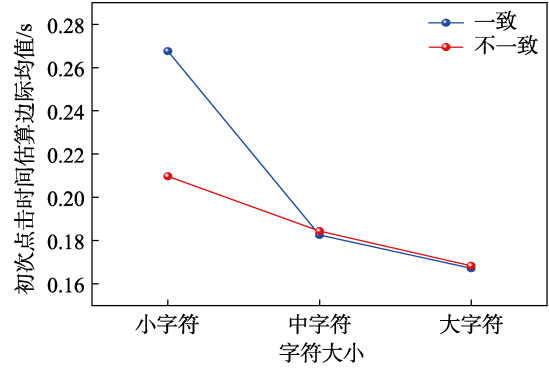


图 13 字符大小与颜色一致性交互效应

Fig.13 Interaction effect between character size and color consistency

雾气程度的主效应显著 $F(3,108)=317.585$, $P<0.001$; 字符大小的主效应显著 $F(2,72)=427.680$, $P<0.001$; 颜色一致性的主效应显著 $F(1,36)=77.541$, $P<0.001$ (颜色一致性不足 3 组不做事后检验)。对雾气程度与字符大小的事后检验中发现, 未产生雾气的初次点击时间显著低于低雾气、中雾气和高雾气。小字符的初次点击时间显著高于大字符。

3.2 总注视时间

对总注视时间进行多因素方差分析发现, 雾气程度、字符大小、颜色一致性 3 种因素的交互效应显著 $F(6,216)=2.643$, $P<0.05$ 。经进一步简单效应检验发现, 在未产生雾气场景中, 在小字符与中字符水平下, 颜色不一致的总注视时间显著低于颜色一致, 而在大字符水平下, 颜色不一致的总注视时间略低于颜色一致。在低雾气场景中, 在小字符与中字符水平下, 颜色不一致的总注视时间显著低于颜色一致, 而在大字符水平下, 颜色不一致的总注视时间与颜色一致无显著差异。在中雾气场景中, 在小字符与大字符水平下, 颜色不一致的总注视时间显著低于颜色一致, 而在中字符水平下, 颜色不一致的总注视时间与颜色一致无显著差异。在高雾气场景中, 在小字符水平下, 颜色不一致的总注视时间显著低于颜色一致, 而在中字符与大字符水平下, 颜色不一致的总注视时间与颜色一致无显著差异。将所有水平下的总注视时间进行比较后发现, 在未产生雾气场景中, 大字符颜色不一致组合的总注视时间较短, 而在高雾气场景中, 小字符颜色一致组合的总注视时间最长。总注视时间的多因素方差分析结果如表 2 所示。

表 2 总注视时间多因素方差分析结果			
Tab.2 Multivariate ANOVA results of total fixation time			
因素名称	F	P	η^2
雾气程度	79.624	<0.001	0.217
字符大小	167.878	<0.001	0.280
颜色一致性	97.312	<0.001	0.101
雾气程度×字符大小	8.988	<0.001	0.059
雾气程度×颜色一致性	0.352	=0.788	0.001
字符大小×颜色一致性	42.503	<0.001	0.090
雾气程度×字符大小×颜色一致性	2.643	=0.015	0.018

雾气程度与字符大小的交互效应显著 $F(6, 216)=8.988$, $P<0.001$, 交互效应如图 14 所示; 字符大小与颜色的一致性交互效应显著 $F(2, 72)=42.503$, $P<0.001$, 交互效应如图 15 所示。在小字符水平下, 未产生雾气的总注视时间显著低于高雾气。在大字符水平下, 未产生雾气的总注视时间显著低于高雾气。在颜色一致和颜色不一致两种水平下, 小字符的总注视时间均显著高于大字符的总注视时间。

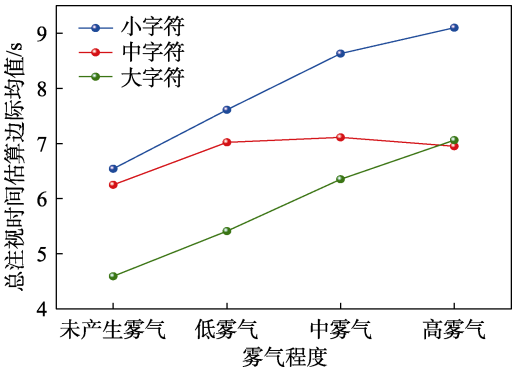


图 14 雾气程度与字符大小交互效应
Fig.14 Interaction effect between fog level and character size

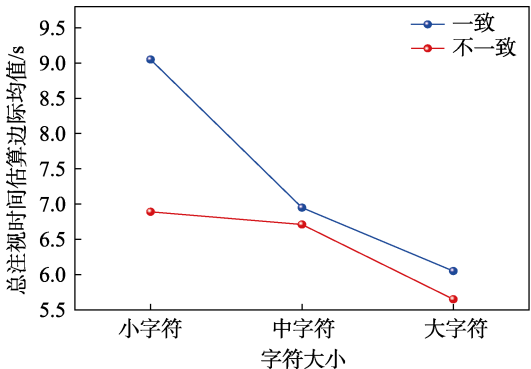


图 15 字符大小与颜色一致性交互效应
Fig.15 Interaction effect between character size and color consistency

雾气程度的主效应显著 $F(3,108)=79.624$, $P<0.001$; 字符大小的主效应显著 $F(2,72)=167.878$, $P<0.001$; 颜色一致性的主效应显著 $F(1,36)=97.312$, $P<0.001$ (颜色一致性不足 3 组不做事后检验)。对雾气程度与字符大小的事后检验发现, 未产生雾气的总注视时间显著低于低雾气、中雾气和高雾气。小字符的总注视时间显著高于中字符与大字符。

3.3 注视点数量

对注视点数量进行多因素方差分析发现, 雾气程度、字符大小、颜色一致性 3 种的因素交互效应显著 $F(6,216)=2.301$, $P<0.05$ 。经进一步简单效应检验发现, 在未产生雾气场景中, 在小字符水平下, 颜色不一致的注视点数量显著低于颜色一致; 在中字符与大字符水平下, 颜色不一致的注视点数量略低于颜色一致。在低雾气场景中, 在小字符水平下, 颜色不一致的注视点数量显著低于颜色一致, 而在中字符与大字符水平下, 颜色不一致的注视点数量与颜色一致无显著差异。在中雾气场景中, 在小字符与大字符水平下, 颜色不一致的注视点数量显著低于颜色一致, 而在中字符水平下, 颜色不一致的注视点数量与颜色一致无显著差异。在高雾气场景中, 在小字符与中字符水平下, 颜色不一致的注视点数量显著低于颜色一致, 而在大字符水平下, 颜色不一致的注视点数量与颜色一致无

显著差异。将所有水平下的注视点数量进行比较后发现, 未产生雾气下大字符颜色不一致组合的注视点数量最少, 而高雾气下小字符颜色一致组合的注视点数量最多。注视点数量的多因素方差分析结果如表 3 所示。

表 3 注视点数量多因素方差分析结果 Tab.3 Multivariate ANOVA results of foveated number			
因素名称	<i>F</i>	<i>P</i>	η^2
雾气程度	105.760	<0.001	0.269
字符大小	182.267	<0.001	0.297
颜色一致性	114.332	<0.001	0.117
雾气程度×字符大小	10.719	<0.001	0.069
雾气程度×颜色一致性	1.014	=0.386	0.004
字符大小×颜色一致性	31.703	<0.001	0.068
雾气程度×字符大小×颜色一致性	2.301	0.033	0.016

雾气程度与字符大小的交互效应显著 $F(6, 216) = 10.719, P < 0.001$, 交互效应如图 16 所示; 字符大小与颜色一致性的交互效应显著 $F(2, 72) = 31.703, P < 0.001$, 交互效应如图 17 所示。在小字符水平下, 高雾气的注视点数量显著高于未产生雾气。在大字符水平下, 未产生雾气的注视点数量显著低于高雾气。在颜色一致水平下, 小字符的注视点数量显著高于大

字符。在颜色不一致水平下, 小字符的注视点数量显著高于大字符。

雾气程度的主效应显著 $F(3, 108) = 105.760, P < 0.001$; 字符大小的主效应显著 $F(2, 72) = 182.267, P < 0.001$; 颜色一致性的主效应显著 $F(1, 36) = 114.332, P < 0.001$ (颜色一致性不足 3 组不做事后检验)。对雾气程度与字符大小的事后检验发现, 未产生雾气和低雾气的注视点数量显著低于中雾气与高雾气。大字符的注视点数量显著低于小字符与中字符。

4 结果讨论

本研究旨在考察不同雾气程度下字符大小及颜色一致性对医护人员长时间佩戴护目镜的视觉搜索效率的影响。在实验中探讨了不同雾气程度、字符大小与颜色一致性的单独影响效应; 雾气程度与字符大小、雾气程度与颜色一致性、字符大小与颜色一致性, 以及 3 者之间的交互效应影响。实验表明雾气程度、字符大小、颜色一致性均对视觉搜索效率有显著影响。

4.1 雾气程度、字符大小、颜色一致性对视觉搜索效率的行为指标分析

采用行为指标 (初次点击时间) 作为衡量标准, 行为数据结果表明, 雾气程度、字符大小与颜色一致性对用户的视觉搜索效率的交互效应显著。在护目镜未产生雾气、低雾气场景下大字符颜色不一致的视觉搜索效率更高, 这与其他研究结果基本一致。宫勇等^[22]提出利用颜色来区分图标之间的差异, 从而更加有效地提高图标的视觉搜索效率。特征整合理论^[23]认为视觉加工主要有两大阶段, 对特征基本元素的处理发生在较早的特征登记阶段 (前注意阶段), 这一阶段不需要集中性关注, 处理过程是一种平行的、自动化的过程, 当图标与数值颜色不一致时, 视觉系统在特征登记阶段通过图标与数值的较大颜色差异, 可以快速识别图标与数值, 提高视觉搜索效率; 视觉加工的第二个阶段是特征整合阶段 (物体知觉阶段), 这一阶段需要集中性注意处理特征的位置信息, 是一种非自动化、序列的处理, 当图标与数值颜色一致时, 视觉搜索目标需要检验各图标与数值信息, 此时视觉系统进行序列加工, 初次点击时间变长, 视觉搜索效率降低。同时基于认知负荷理论^[24], 在未产生雾气与低雾气的识别界面信息中认知负荷较低, 用户搜索更为容易, 视觉搜索效率更高。在护目镜雾气程度达到中雾气与高雾气时, 中字符颜色不一致的视觉搜索效率更高, 这与许百华等^[25]提出随着字符逐步增大, 能提高视觉搜索效率与正确率的结果不太一致。合理的解释是, 用户在中雾气、高雾气水平下观测主要受雾气模糊程度的影响较大, 大字符反而会增加用户的认知负荷, 产生负向作用, 从而增加用户的初次点击时间。

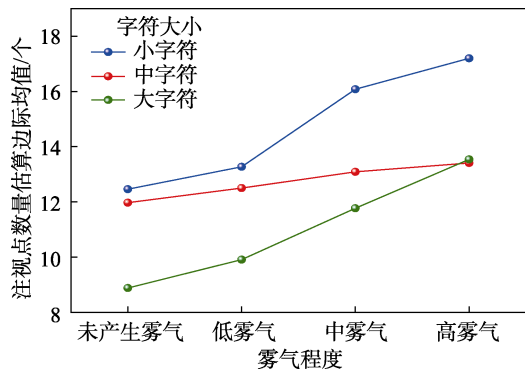


图 16 雾气程度与字符大小交互效应
Fig.16 Interaction effect between fog level and character size

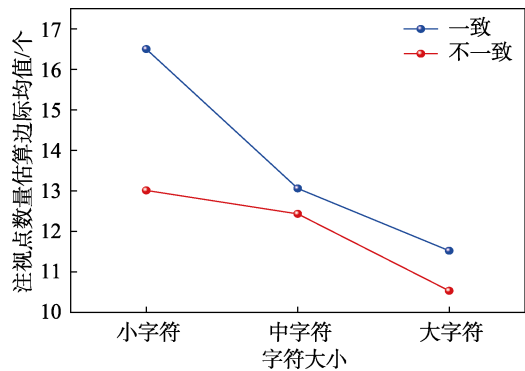


图 17 字符大小与颜色一致性交互效应
Fig.17 Interaction effect between character size and color consistency

4.2 雾气程度、字符大小、颜色一致性对视觉搜索效率的眼动指标分析

采用眼动指标（总注视时间与注视点数量）作为衡量标准。总注视时间指在 AOI 兴趣区内或单个目标上所有注视时间的总和，它反应的是总时间上的信息加工。总注视时间越长，认知加工过程就越慢，视觉搜索效率越低。注视数量代表被试群体对 AOI 兴趣区内或图形界面认知加工的次数，注视点数量越多表示被试对该区域的绝对注意力，也可理解为不理解程度越高。实验结果表明，雾气程度、字符大小与颜色一致性对用户的视觉搜索效率交互效应显著。在护目镜未产生雾气、低雾气与中雾气场景下大字符颜色不一致的总注视时间更少，注视点的数量更少，视觉搜索效率更高。而颜色一致的总注视时间更长，注视点的数量更多，视觉搜索效率低于颜色不一致，这是由于颜色一致性带来的信息加工难度大于颜色一致，需要分配的注意资源更多，消耗的时间也就越长。但当护目镜雾气程度达到高雾气时，中字符颜色不一致的总注视时间更少，注视点的数量更少，视觉搜索效率更高，这与行为指标中作出的解释一致。由于较小字符、极端情况下的大字符与颜色一致给用户带来的认知负荷较大，需要投入更多的注意，过多的信息量会消耗大量的认知资源，从而导致总注视时间与注视点数量的增加，以及视觉搜索效率的降低。

4.3 雾气程度、字符大小、颜色一致性对视觉搜索效率的设计优化方案

通过实验分析，以实验结果为导向，对心电监护仪界面进行优化设计以提高医护人员的视觉搜索效率。在未产生雾气和低雾气场景下，大字符颜色不一致的显示界面在行为指标评价和眼动指标评价中表现最好；在中雾气和高雾气场景下，中字符颜色不一致的显示界面在行为指标评价和眼动指标评价中表现最好。根据视觉后负像产生干扰效应^[26]和布局位置对视觉搜索效率的影响^[27]，进行颜色不一致配色，并遵循三大原则：避免强对比色或互补色；避免低明度色在弱势区的使用；突出重要信息，将高明度色放在醒目区。优化后的设计方案如图 18~19 所示。



图 18 未产生雾气和低雾气环境下优化方案
Fig.18 Optimized solutions for non-fog and low fog environment

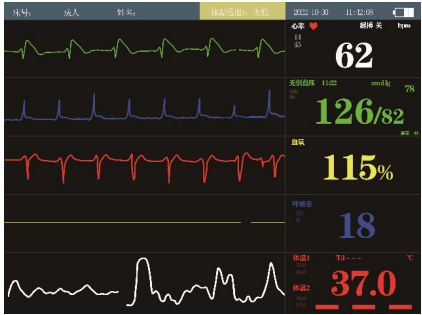


图 19 中雾气和高雾气环境下优化方案
Fig.19 Optimized solutions for medium and high fog environment

5 结语

本研究利用眼动追踪技术，通过点击实验与视觉搜索实验对被试的行为数据与眼动数据进行了全方位分析，得出以下结论：医护人员佩戴护目镜产生雾气的环境因素与界面设计中字符大小、颜色一致性三者之间的交互效应显著。当在未产生雾气与低雾气的场景下戴上护目镜时，建议数值使用大字符、图标与数值采用颜色不一致的界面设计，降低认知负荷，增大编码之间的特征以达到提高视觉搜索效率的作用。当在雾气程度上升的情况下戴上护目镜，可见度降低时，建议数值使用中字符、图标与数值采用颜色不一致的界面设计以提高医护人员的读取效率。

本研究存在一定的局限性，具体如下。

1) 考虑到护目镜产生雾气后眼动仪不能准确捕捉瞳孔信息，故采用不同透光程度的玻璃板离开显示屏一定距离的观测方法模拟护目镜产生雾气的情况，这和医护人员在手术时的实际情景有一定的区别。在未来的研究中，将对真实场景的数据进行分析。

2) 由于本实验的被试多为设计学在校研究生，而医护人员与具有医学相关背景人员的样本较少，存在些许不足，后续研究将扩充医护人员样本，进行更加全面的实验。

参考文献：

- [1] 关红, 黄丽红. 监护仪临床应用与指导[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
GUANG H, HUANG L H. Clinical Application and Guidance of Monitors[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [2] YUNIARTO H A. The Shortcomings of Existing Root Cause Analysis Tools[C]// Proceedings of the World Congress on Engineering. London: Newswood, 2012.
- [3] BAE J, HELLDIN T, RIVEIRO M. Identifying Root Cause and Derived Effects in Causal Relationships[C]// International Conference on Human Interface and the Management of Information. Vancouver: Springer Verlag, 2017.

- [4] 威肯斯 C D, 赫兰兹 J G, 班伯里 S, 等. 工程心理学与人的作业[M]. 张侃, 孙向红, 译. 北京: 机械工业出版社, 2014.
WICKENS C D, HOLLANDS J G, BANBURY S, et al. Engineering Psychology & Human Performance[M]. ZHANG K, SUN X H, translated. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [5] 宫勇, 张三元, 刘志方, 等. 颜色对图标视觉搜索效率影响的眼动研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(10): 1987-1994.
GONG Y, ZHANG S Y, LIU Z F, et al. Eye Tracking Research on the Effect of Color on Icon Visual Search Efficiency[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2016, 50(10): 1987-1994.
- [6] 宫殿坤, 郝春东, 王殿春. 字体特征与搜索方式对视觉搜索反应时的影响[J]. 心理科学, 2009, 32(5): 1142-1145.
GONG D K, HAO C D, WANG D C. The Influence of Font Characteristics and Search methods on Visual Search Reactions[J]. Psychological Science, 2009, 32(5): 1142-1145.
- [7] 方浩, 陈印超, 赵莹, 等. 移动端新闻平台信息设计要素对视觉搜索效率的影响机制[J]. 图书情报工作, 2019, 63(22): 58-67.
FANG H, CHEN Y C, ZHAO Y, et al. The Influence Mechanism of Information Design Elements of Mobile News Platform on Visual Search Efficiency[J]. Library and Information Work, 2019, 63(22): 58-67.
- [8] 常方圆. 基于眼动仪的智能手机APP图形用户界面设计可用性评估[J]. 包装工程, 2015, 36(8): 55-59.
CHANG F Y. Usability Evaluation of Smart Phone APP Graphical User Interface Design Based on Eye Tracker[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(8): 55-59.
- [9] NÄSÄNEN R, OJANPÄÄ H. Effect of Image Contrast and Sharpness on Visual Search for Computer Icons[J]. Displays, 2003, 24(3): 137-144.
- [10] HUANG K C. Effects of Computer Icons and Figure/Background Area Ratios and Color Combinations on Visual Search Performance on an LCD monitor[J]. Displays, 2008, 29(3): 237-242.
- [11] BARTRAM L, WARE C, CALVERT T. Moticons: Detection, Distraction and Task[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2003, 58(5): 515-545.
- [12] 维尔 C. 设计中的视觉思维[M]. 陈媛娜, 译. 北京: 机械工业出版社, 2009.
WARE C. Visual Thinking for Design[M]. CHEN Y Y, translated. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [13] WARE C, BONNER J, KINGHT W, et al. Moving Icons as a Human Interrupt[J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 1992, 4(4): 341-348.
- [14] 田琦, 吕淑然. 基于照明及眼动实验的冰箱操作界面优化设计[J]. 包装工程, 2021, 42(24): 230-236.
TIAN Q, LYU S R. Optimized Design of Refrigerator Operation Interface Based on Lighting and Eye Tracking Experiments[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(24): 230-236.
- [15] KOLERS P A, DUCHNICKY R L, FERGUSON D C. Eye Movement Measurement of Readability of CRT Displays[J]. Human Factors, 1981, 23(5): 517-527.
- [16] BABARIA B R, ALVAREZ T L, BERGEN M T, et al. Transmission of Light in a Synthetic Fog Medium[C]// Proceedings of IEEE 30th Annual Northeast Bioengineering Conference. Springfield: IEEE, 2004.
- [17] ZAINI M F B, KURNIAWAN B A, YOSHIO N, et al. Perceived Brightness and Saturation of Color LED Light in Dense Fog at Night Time[J]. Journal of Light & Visual Environment, 2009, 33(2): 107-109.
- [18] 高建平, 张续光. 雾天对高速公路驾驶员视觉影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(9): 68-72.
GAO J P, ZHANG X G. Study on the Visual Impact of Foggy Days on Highway Drivers[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(9): 68-72.
- [19] YAO J, HU Z L, JIANG H Y, et al. Visual Recognition Efficiency of Handheld Infrared Thermometer Interface Information Under low Ambient Illuminance[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2021, 83(5): 103143.
- [20] REN J W, YAO J, WANG J, et al. Recognition Efficiency of Atypical Cardiovascular Readings on ECG Devices Through Fogged Goggles[J]. Displays, 2022, 72(4): 102148.
- [21] 缪莹莹, 潘伟营, 姜斌. 战术显控系统人机交互中的特征整合设计研究[J]. 包装工程, 2021, 42(20): 85-91.
MIAO Y Y, PAN W Y, JIANG B. Research on Feature Integration Design in Human-computer Interaction of Tactical Display and Control System[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(20): 85-91.
- [22] 宫勇, 张三元, 沈法, 等. 色彩构成对图形符号视觉搜索效率的影响[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(7): 1115-1120.
GONG Y, ZHANG S Y, SHEN F, et al. The Influence of Color Composition on the Visual Search Efficiency of Graphic Symbols[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(7): 1115-1120.
- [23] TREISMAN A, GELADE G. A Feature Integration Theory of Attention[J]. Cognitive Psychology, 1980, 12(1): 97-136.
- [24] BECK M R, LOHRENZ M C, TRAFTON J G. Measuring Search Efficiency in Complex Visual Search Tasks: Global and Local Clutter[J]. Journal of Experimental Psychology: Applied, 2010, 16(3): 238-250.
- [25] 许百华, 傅亚强. 液晶显示器上字符辨认效果与观察角度及字符大小的关系[J]. 心理科学, 2001(5): 563-565.
XU B H, FU Y Q. The Relationship between the Character Recognition Effect on the LCD Display and the Viewing Angle and Character Size[J]. Psychological Science, 2001(5): 563-565.
- [26] 陈雨嘉, 闫姿伊, 余湛, 等. 视觉负后像对视觉搜索效率的干扰效应[J]. 心理科学, 2020, 43(2): 272-279.
CHEN Y J, YAN Z Y, YU Z, et al. The Interference Effect of Negative Visual Afterimage on Visual Search Efficiency[J]. Psychological Science, 2020, 43(2): 272-279.
- [27] 梁永强, 李培林, 王崴, 等. GUI中图标利用率与易搜索率匹配设计方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(1): 155-162.
LIANG Y Q, LI P L, WANG W, et al. The Icon Utilization in the GUI Matches the Easy Search rate of the Design Method[J]. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2018, 30(1): 155-162.