

基于 AHP 的小型飞机座舱界面信息元素设计研究

任宏, 刘玉雪, 邹媛媛, 张宁宁

(沈阳航空航天大学, 沈阳 110136)

摘要: **目的** 从飞行员飞行过程的实际出发, 探索飞行员对小型飞机座舱界面中各信息元素的辨识度。**方法** 引用层次分析法(AHP), 对现有小型飞机座舱界面中的信息编码进行分析对比。首先参照 C172 座舱界面, 提取小型飞机座舱界面中的文字字体、标记形式、符号形状, 字符色彩等 4 类元素, 全面系统地信息进行归纳分析; 其次基于 AHP, 建立小型飞机座舱界面信息元素辨识度评价体系, 对不同元素表现形式的易辨识度进行分析排序。**结果** 飞行员对不同表现形式的信息元素辨识度存在差异。**结论** Trebuchet MS 的文字字体、缩写的标记形式、三角形的符号形状辨识度较高, 可应用于小型飞机座舱界面优化设计中。黄色/黑色、绿色/黑色作为目标信息与背景的色彩搭配辨识度最高, 纯蓝色则不适合作为目标信息色彩编码。

关键词: 小型飞机; 驾驶舱; 信息元素; 层次分析法; 界面设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)10-0232-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.10.028

Information Element Design of Cabin of Small Aircraft Based on AHP

REN Hong, LIU Yu-xue, ZOU Yuan-yuan, ZHANG Ning-ning

(Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

ABSTRACT: The paper aims to explore the pilots' identification of information elements in cockpit interface of small aircraft based on the actual flight process. AHP is used to analyze and compare the information coding in the cockpit interface of small aircraft. Firstly, referring to the cockpit interface of C172, four elements of text font, marking form, symbol shape and character color are extracted from the cockpit interface of small aircraft, and the information is comprehensively and systematically summarized and analyzed. Secondly, based on AHP, the identification evaluation system of small aircraft cockpit interface information elements is established, and the identification degree of different elements forms is analyzed and ranked. There are differences in pilots' identification of information elements in different forms. The Trebuchet MS has high recognition of the text font, the marking form of the abbreviation form and the symbol shape of the triangle, which can be applied to the optimization design of the cabin interface of small aircraft. Yellow/black and green/black are the colors with the highest recognition for the target information and background, while pure blue is not suitable for the color coding of the target information.

KEY WORDS: small aircraft; cockpit; information element; analytic hierarchy process (AHP); interface design

近几年,我国民用航空工业中的通用航空领域不断扩容,小型飞机的飞行总量每年约以 10%^[1]的规模稳步增长。飞行员在驾驶小型飞机时的人机交互行为主要集中于飞机座舱界面,座舱界面是人机信息交流的载体,在信息传递过程中扮演着重要的角色。飞行

员主要通过视觉、听觉和触觉等感觉器官来获取信息,其中视觉信息占据了 80%以上^[2],视觉信息绝大多数来自飞机座舱界面,通过对其简洁高效的设计,不仅充分发挥了飞机的性能,也能够确保飞行的安全。

由于飞机的自动化程度和信息集成化程度逐步

收稿日期: 2022-01-08

基金项目: 教育部人文社科基金(20YJCZH227)

作者简介: 任宏(1967—),女,硕士,教授,主要研究方向为人机工程与交互设计。

通信作者: 张宁宁(1982—),女,博士,副教授,主要研究方向为设计的量化分析。

提高, 操作系统也更加错综复杂。在飞行过程中, 飞行员主要通过飞机座舱界面来获取当前的飞行状况, 并对海量的数据进行快速的分析和判断, 大幅增加了飞行员的认知负荷^[3], 从而对飞行安全带来潜在隐患。小型飞机座舱内部空间有限, 无论对行为空间还是显示布局均需要统筹设计, 取舍权重信息, 才能在局促的显控界面上完整合理地显示各种飞行信息, 这就给小型飞机座舱界面设计带来了新的挑战。文中利用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP), 提取小型飞机座舱界面中的文字字体、标记形式、符号形状, 字符色彩等 4 类元素, 全面系统地对信息进行归纳总结, 研究不同信息元素表现形式带给飞行员的感知, 为小型飞机座舱界面设计提供理论依据。

1 飞机座舱界面设计准则

1.1 界面信息可视性原则

小型飞机座舱界面不仅是飞行员接收飞行信息的载体, 同时也是飞行员与飞机交互控制的平台。在复杂的飞机座舱界面中, 运用信息设计方法将大量且繁杂的飞行数据进行重组, 同时结合字符编码、图符编码等多种编码技术, 使信息显示更加合理、有序。其中, 可视性原则是信息设计的基础, 在传统意义上指的是视觉通达性^[4]。在小型飞机座舱界面设计中, 要充分考虑光照、振动、噪声等环境因素的影响, 同时也要保证飞行员对其进行快速识别。

1.2 小型飞机座舱界面信息元素设计准则

根据飞机座舱界面信息设计的相关准则, 如咨询通告 (Advisory Circular, AC25-11A) 等相关局方资料显示, 小型飞机座舱界面显示的信息内容主要由飞行数据和参数, 以及具有提示意义的标记组成, 而表征这些信息的设计元素有文字、符号, 以及文字和符号的组合。各种元素在形态、大小、颜色等方面都有各自的特点和表现形式, 色彩是人们识别和搜索信息的关键因素^[5]。由于小型飞机座舱内仪表盘及显示器尺寸受到空间的限制, 依靠增大信息元素尺寸来提高识别度是很困难的。为了提升飞行员的识别效率, 除了要对信息的密度和强度进行控制之外, 还应重点关注信息元素的表现形式。在信息元素的表现形式上, 应适当增加元素之间的差异和对比度, 以增强信息的识别度, 并确保界面的和谐与一致。如果信息元素太过突出, 反而会对视觉搜索造成影响^[6]。

2 小型飞机座舱界面信息元素提取及研究对象

2.1 小型飞机座舱界面信息元素提取

2.1.1 文字字体

屏幕显示所用的字母和数字必须具有适当的大

小、高宽比、字距、笔画宽度等, 保证飞行员在正常的视距与视野范围内快速捕捉与识别。除此之外, 不同的字体、字形、字重也会对信息传递效率产生影响, 从而影响整体的视觉体验。例如, 选择更容易产生细微水平结构的字体, 会对西文字母产生一种视觉图形化组合的水平阅读引导, 使飞行员顺滑且连续地识别组合信息。座舱显示界面的字体选择应充分考虑显示技术水平与承载环境, 与等线字体相比, 常规的衬线字体在低分辨率下发生形变, 导致信息识别度降低。在有限的屏幕空间中, 字体成为影响文字信息识别的关键因素, 并直接影响飞行信息接收的质量。故选择 4 种具有代表性的英文字体, 即: Verdana、Tahoma、Trebuchet MS 和 Georgia。这 4 种英文字体是屏显专用字体中的佼佼者, 为微软的核心内置字体, 应用广泛, 综合评价较高^[7]。其中, Verdana、Tahoma、Georgia 由世界级字型设计大师马修·卡特专门为微软设计, 是英文 Windows 操作系统的默认字体。Trebuchet Ms 是一款人性化的无衬线字体, 它是 1996 年文森·寇奈尔专门为微软公司设计的, 被广泛应用于网页与屏幕显示。对文本字体进行评价时, 要保证字体大小、字符色彩、间距等基本属性一致, 减少无关变量的影响。

2.1.2 标记形式

在飞机座舱界面中, 标记是一种特殊的符号, 它代表功能信息的具体含义或控制件的功能, 对小型飞机驾驶员长时记忆的觉醒起提示作用。通过对不同区域的数字、符号或文字信息进行标记, 可以帮助飞行员更容易地理解信息的含义以及控制件的信息反馈。图符、专业术语缩略语作为标记的主要表现形式, 在设计和选择中应简洁有力且辨识度高, 对应不同显示与控制内容的标记应存在明显的区别。小型飞机座舱界面中存在多种标记形式, 例如, 完整标语形式、缩写形式、图标形式、图标与缩写形式等, 文中选取使用频率最高的 4 种标记形式作为评价对象。

2.1.3 符号形状

由于符号具有很强的特性, 所以在信息界面上频繁地出现, 它可以通过更直观的方式来增强信息的识别效率, 从而帮助用户获得数据以及数据之间隐含的关系^[8]。符号可以进一步分为图标、象征符号和指示符号。指示符号是一种用来指明抽象事物并建立事物之间联系的符号, 在飞机座舱界面中用来指示信息, 并表示信息实时的变化趋势。皮尔斯指出, 指示符号可以指向具体的信息或者指代特定的物体, 该信息或物体与指示符号之间有一定的动力联系, 或者与用户的感知和记忆有关, 从而引起用户的注意^[9]。由于各方标准中对指示符号的使用没有明确规定^[10], 文中将对符号形状 (包括: 上箭头、五边形箭头、指北箭头、三角形) 做进一步研究。

2.1.4 字符色彩

色彩对信息认知效果有着巨大的影响,色彩的不同搭配会导致信息识别效率的不同,好的色彩搭配增加了相关信息的突显程度,并降低了无关信息的干扰。色彩在视觉信息设计中承担增加诱导性和注目性的重任,好的色彩编码对信息界面的内涵情感与功能识别均高于其他信息要素的影响力。从这个角度来看,色彩可以决定信息传递的效率,而对色彩进行科学的选择和搭配,则会改善人机交互的体验。

根据飞机座舱界面的色彩编码准则,界面中的色彩信息应该符合下列原则:色彩数量不超过6种,过多的色彩选择会干扰飞行员的判断,出现识别困难和操作失误;色彩编码应该符合适航标准,可选取红色作为告警色,采用除绿色和红色外的颜色作为咨询告警色^[11];禁止使用强烈的对比色进行色彩搭配,如绿色和深红色、红色和深蓝色、黄色和紫色等;注意背景色与目标色的选择,不要选择模糊的配色组合,比如黑色和蓝色;背景的色彩与肌理只能起到承载目标色的作用,不能压制目标及其相关元素;整个驾驶舱色彩应协调统一,不要出现对比度过高或过低的现象,不要有联想的歧义,应遵循整体信息管理体系的设计要求,比如蓝色和褐色,分别代表天空和大地。

小型飞机座舱中仅对部分信息色彩进行了规定,例如天空、大地等环境色,特定的告警功能颜色,以及特定的校准线、参考符号等显示特征颜色。对目标字符与背景的色彩搭配,目前还没有一个清晰的定义^[12],因此文中针对目标字符与背景的色彩搭配进行辨识度评判。为了保证评价的准确性,保持目标字符纯度值为99%、明度值为66%,仅通过调整色相值来设置实验材料。此研究将对以下6种作为目标信息与背景的色彩搭配进行研究:黄色/黑色、绿色/黑色、绿色/棕色、黄色/棕色、蓝色/棕色、蓝色/黑色。

2.2 研究对象

选择16名对传统机械式仪表较为熟悉的飞行专业本科生(均为男性,年龄在20~24岁),他们都具备模拟飞行经验且了解小型飞机座舱界面信息,视力或矫正视力良好,无色盲、色弱、散光等眼部疾病,心理健康,能够理解并配合完成此次实验任务。

3 AHP 及其分析过程

3.1 层次分析法

层次分析法是美国 Saaty 教授首次提出的一种研究方法^[13],该方法融合定性与定量研究的优势,将复杂信息要素分解为多重信息层级,有序排列,以其独有方式评价所有影响因子的权重。目前 AHP 被应用于多种领域中,特别是城市规划、军事战略决策、科研评价及项目管理信息的分类和筛选,并且已经在 A380 和 B-787 型宽体飞机的信息重组中得到了应用。

3.2 构建元素辨识度评价体系

由于小型飞机座舱界面信息元素量大且繁杂,因此可通过层次分析法构建元素辨识度评价体系,以确定各信息元素的表现形式及属性。将小型飞机座舱界面视为一个整体,以界面信息元素为评价主体,以文字字体、标记形式、符号形状、字符色彩4种信息元素为评价类别,结合这些元素的特征和形式,构建元素辨识度评价体系,见图1。









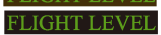


评价主体	评价类别	元素具体表现形式
小型飞机座舱界面信息元素	文字字体C ₁	C ₁₁ FLIGHT LEVEL
		C ₁₂ FLIGHT LEVEL
		C ₁₃ FLIGHT LEVEL
		C ₁₄ FLIGHT LEVEL
	标记形式C ₂	C ₂₁ True Airspeed
		C ₂₂ TAS
		C ₂₃ 
		C ₂₄  TAS
	指示符号形状C ₃	C ₃₁ 
		C ₃₂ 
		C ₃₃ 
		C ₃₄ 
	目标字符色彩C ₄	C ₄₁ 
		C ₄₂ 
		C ₄₃ 
		C ₄₄ 
C ₄₅ 		
C ₄₆ 		

图1 元素辨识度评价体系

Fig.1 Element identification evaluation system

3.3 确定判断矩阵

在建立元素辨识度评价体系时,要了解每个指标在目标决策中所占的比重,才能实现决策的目的。在 AHP 中, Saaty 教授提出了一种基于一致性矩阵的方法,它不需要将各个因子进行比较,而使用相对比较的方法,进行2个元素之间的对比。针对某种元素的特征和形式,将其下的各个设计元素进行两两比较,按照它们的重要程度,构建出如式(1)的判断矩阵,然后由该式(1)计算各个元素的权重。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{12} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n1} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

这种判断矩阵具有以下特性: $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ 。式中 a_{ij} 指

第 i 种字体与第 j 种字体相比,辨识度程度的判断值。根据 Saaty 的“1—9 标度法”,国内外相关研究者针对不同的目标,提出了一系列的标度方法(如指数标

度法、分数标度法等), 文中采用“1—9 标度法”的基本原则, 构建了飞行员对信息元素的辨识度标度表, 见表 1。

表 1 元素辨识度标度
Tab.1 Element importance scale table

辨识度量化值	含义说明
9	前一个元素辨识度极端高于后一个元素
7	前一个元素辨识度强烈于后一个元素
5	前一个元素辨识度明显高于后一个元素
3	前一个元素辨识度略高于后一个元素
1	前后两元素辨识度相同
2, 4, 6, 8	分别为上述相邻判断的中间值

根据辨识度量化值指标含义说明, 被试者通过对同一评价类别中的各种元素的表现形式进行两两比较打分, 并对得出的分数计算其算数平均值, 得到的数据可以作为辨识参数。

3.4 层次单排序及一致性检验

3.4.1 层次单排序

层级单排序是指在该层的各个元素的重要程度排序, 主要针对上一层某因素而言的。根据 1—9 标度法中的判断矩阵 A , 其中各层次元素的权重值可使用式 (2) 计算:

$$Aw = \lambda_{\max} w \quad (2)$$

式中: 矩阵 A 中的最大特征根可以通过 λ_{\max} 表示; w 是 λ_{\max} 对应的特征向量。对 w 进行归一化处理, 得到的结果就是判断矩阵 A 的权重分配, 可以称这种计算过程为层次单排序^[14]。其中, 文中通过方根法得到矩阵 A 的权重向量。

1) 求矩阵 A 中各行元素的乘积, 见式 (3)。

$$m_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

2) 特征向量 $W^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)^T$ 可以通过式 (4) 得:

$$w_i^* = \sqrt[n]{m_i} \quad (4)$$

3) 将特征向量 W_1^* 归一化, 可以得到式 (5):

$$w_i = \frac{w_i^*}{\sum_{i=1}^n w_i^*} \quad (5)$$

3.4.2 一致性检验

在计算权重的过程中, 存在多种主观及客观因素, 因此需要对判断矩阵使用一致性检验方法, 以验证结果的合理准确。

$$M_{CR} = \frac{M_{CI}}{M_{RI}} \quad (6)$$

式中: M_{RI} 表示平均随机一致性指标, 其值和判

断矩阵 A 的阶数相关。

常规一致性指标定义:

$$M_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

式中: 当一致性指标为 0, 则判定判断矩阵 A 具有完全的一致性; 当一致性指标接近 0, 则判定判断矩阵 A 具有满意的一致性。 M_{RI} 与阶数 n 的关系见表 2, 可以通过 M_{RI} 衡量 M_{CI} 的大小, 阶数 n 越小则越不容易出现一致性随机偏离的现象^[15]。

表 2 “1—9” 阶判断矩阵平均随机一致性指标 M_{RI} 标准值
Tab.2 "1-9" order judgment matrix average stochastic consistency indicator standard value

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
M_{RI}	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当 $M_{CR} < 0.1$ 时, 则判定该矩阵符合要求。当 $M_{CR} > 0.1$ 时, 需要改变矩阵中的各元素的特征和形式, 直到 $M_{CR} < 0.1$ 为止。

4 数据分析

4.1 文字字体辨识度

通过对文字字体中的各种元素的表现形式进行两两比较打分, 对得出的分数计算其算数平均值, 得出判断矩阵 C_1 :

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.46 & 0.18 & 0.22 \\ 2.5 & 1 & 0.20 & 0.23 \\ 5.75 & 5.50 & 1 & 2.50 \\ 4.81 & 4.50 & 0.42 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

对每一行的几何平均数进行计算, 得到特征向量 W_1^* :

$$W_1^* = (0.065, 0.103, 0.526, 0.306) \quad (9)$$

对向量 W_1^* 进行归一化处理, 得到权重向量 W :

$$W_1 = (0.274, 0.440, 2.230, 1.301) \quad (10)$$

由向量 W 和矩阵 C_1 求得最大特征根和 M_{CI} :

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(C_1 W_1)_i}{W_i} = 4.251 \quad (11)$$

$$M_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.084 \quad (12)$$

查询 M_{RI} 阶数表可知, 当元素数是 4 时, $M_{RI} = 0.90$, 求得 M_{CR} 值:

$$M_{CR} = \frac{M_{CI}}{M_{RI}} = 0.093 < 0.1 \quad (13)$$

因此, 认为判断矩阵 C_1 具有满意的一致性, 可以根据权重向量 W_1 的大小对文字字体中各元素辨识度进行排序, W_1 越大, 辨识度越高; 辨识度从高到

低的排序结果依次为 $C_{13}>C_{14}>C_{12}>C_{11}$ 。

4.2 标记形式、指示符号和字符色彩辨识度

按照文字字体评价的步骤与方法,继续完成对标记形式、符号形状和字符色彩等其他3种信息元素的辨识度评价矩阵计算,推导出对应的特征向量,并对各信息元素的辨识度权重向量进行排序,信息元素辨识度评价结果见表3。

表3 信息元素辨识度评价结果

评价类别	表现形式	特征向量	权重向量	排序
文字字体	Verdana	0.065	0.274	4
	Tahoma	0.103	0.440	3
	Trebuchet MS	0.526	2.230	1
	Georgia	0.306	1.301	2
标记形式	完整标语	0.291	1.288	2
	缩写	0.496	2.089	1
	图标	0.078	0.331	4
	图标与缩写	0.134	0.571	3
符号形状	上箭头	0.222	0.947	2
	五边形箭头	0.066	0.280	4
	指北箭头	0.162	0.702	3
	三角形	0.550	2.277	1
字符色彩 (目标字符/背景颜色)	黄色/黑色	0.382	2.343	1
	蓝色/黑色	0.505	0.312	6
	黄色/棕色	0.128	0.787	4
	绿色/棕色	0.174	1.071	3
	绿色/黑色	0.171	1.072	2
	蓝色/棕色	0.095	0.593	5

5 评价结果分析

通过构建小型飞机座舱界面信息元素层次结构模型,并对数据进行计算和分析,比较各元素的辨识度权重向量。在4种常用于屏显的文字字体中,在保证字符大小、笔画宽度、字母间距、字体色彩、环境影响等相关变量一致的情况下,Trebuchet MS字体(2.230)的辨识度最高,其次为Georgia字体(1.301),而Verdana(0.274)、Tahoma(0.440)这2种字体的辨识度相对较低,文字字体的辨识度权重向量见图2。Trebuchet MS字体虽然是无衬线字体,但是这款字体在一些字母的笔画上有细微的装饰线条,保持了隐约的手写体特征。这在字形上既体现了美学特征,又通过较小的字母宽度和较宽大的字怀提高了识别效率,降低了认知负荷,因此在小型飞机座舱界面设计中可考虑应用辨识度最高的Trebuchet MS字体。

对标记的表现形式,辨识度最高的为缩写形式

(2.089),标记形式的辨识度权重向量见图3。这与飞行员训练习得的认知素养相关,在有限的显示区域中,缩写是最集约有效表达功能信息的形式,且具有国际统一标准,缩短了飞行员对新规范的学习时间,符合飞行员的认知规律。因此在小型飞机座舱界面设计中应用缩写作为标记形式更加合理。

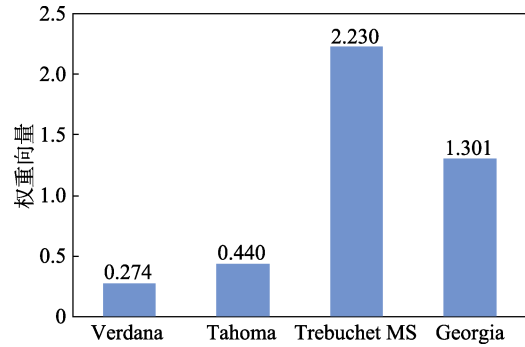


图2 文字字体的辨识度权重向量
Fig.2 Text font recognition degree of the weight vector

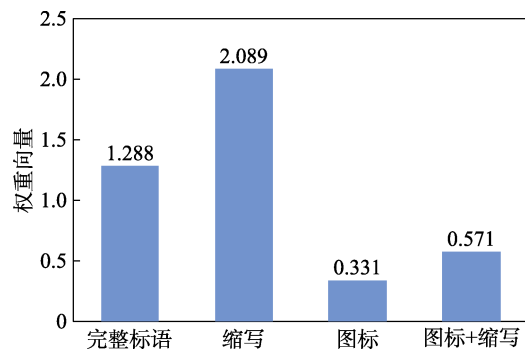


图3 标记形式的辨识度权重向量
Fig.3 Identification weight vector in the form of marker

在这些符号形状中,被试者选取了最易于辨认的三角形(2.277),其次是向上的箭头(0.947),见图4。这与人的认知规律有关,常见的抽象指示符号更容易理解辨识,这4种符号中,三角形与上箭头在生活中更为常见,因此辨识度相对更高,获取的关注度更高,有利于信息的传递。可以把这2种符号形状用于指针设计或指示信息变化趋势,并将它们应用于小型飞机的驾驶舱界面。

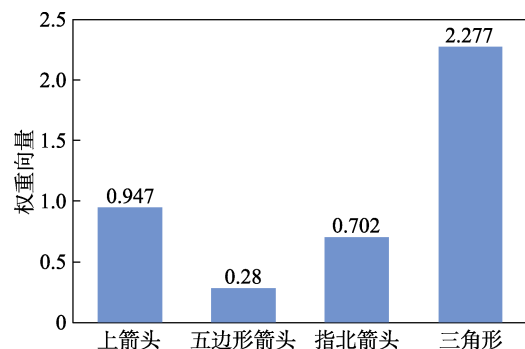


图4 符号形状的辨识度权重向量
Fig.4 Identification weight vector of symbol shape

在目标字符与背景的色彩搭配上, 被试者对色彩的辨识度存在明显的差别。见图 5, 从高到低分别是: 黄色/黑色 (2.343)、绿色/黑色 (1.072)、绿色/棕色 (1.071)、黄色/棕色 (0.787)、蓝色/棕色 (0.593)、蓝色/黑色 (0.312)。在目标字符与背景色彩差异很大的情况下, 能够突出该信息的特征。实验表明, 以黄色、绿色为目标字符, 在黑色、褐色的背景下的辨识度最高, 而纯蓝色不适用于目标字符的颜色。因此应选择目标字符颜色与背景颜色形成明确对比的黄色/黑色、绿色/黑色应用在小型飞机座舱界面设计中, 可以增强飞行员的辨识度, 降低飞行员在飞行过程中的认知负荷。

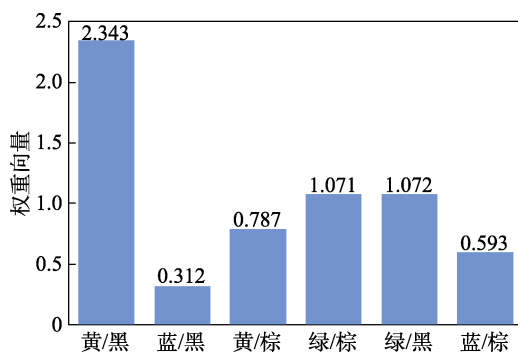


图 5 字符色彩的辨识度权重向量

Fig.5 Character color recognition weight vector

6 结语

以 C172 座舱界面为研究载体, 从小型飞机座舱界面的信息元素编码出发, 提取小型飞机座舱界面中的文字字体、标记形式、符号形状, 字符色彩 4 类元素, 构建元素辨识度评价体系, 利用层次分析法对这 4 类元素进行分析排序。得出辨识度最高评价结果为: Trebuchet MS 的文字字体、缩写形式的标记形式、三角形的符号形状, 以及黄色/黑色、绿色/黑色作为目标信息与背景的字符色彩搭配。这些元素的表现形式及属性可作为小型飞机座舱界面信息元素编码的主要选择。该结论可以有效地为小型飞机座舱界面信息优化设计奠定基础, 起到降低飞行员的认知负荷、提高信息识别效率的作用。

参考文献:

- [1] 董念清. 中国通用航空发展现状、困境及对策探析[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2014, 16(1): 110-117. DONG Nian-qing. A Research on the Situation, Difficulties and Countermeasures of China's General Aviation Development[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2014, 16(1): 110-117.
- [2] 崔卫民, 薛红军, 宋笔锋. 飞机驾驶舱设计中的人因工程问题[J]. 南华大学学报(理工版), 2002, 16(1): 63-66. CUI Wei-min, XUE Hong-jun, SONG Bi-feng. Several Human Factor Engineering Problems in Pilot Cockpit Design[J]. Journal of Central-South Institute of Technology, 2002, 16(1): 63-66.
- [3] MANSIKKA H, VIRTANEN K, HARRIS D. Comparison of NASA-TLX Scale, Modified Cooper-Harper Scale and Mean Inter-Beat Interval as Measures of Pilot Mental Workload during Simulated Flight Tasks[J]. Ergonomics, 2019, 62(2): 246-254.
- [4] 汪海波. 基于认知机理的数字界面信息设计及其评价方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2015. WANG Hai-bo. Research on Information Design and Evaluation Method of Digital Interface Based on Cognitive Mechanism[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [5] VAN O K F, DIVITA J, SHIM M J. Redundant Use of Luminance and Flashing with Shape and Color as Highlighting Codes in Symbolic Displays[J]. Human Factors, 1993, 35(2): 195-204.
- [6] 吴乃群, 史耀军. 网页界面设计中视觉传达的解读[J]. 艺术研究, 2007(3): 69-70. WU Nai-qun, SHI Yao-jun. Interpretation of Visual Communication in Web Interface Design[J]. Art Research, 2007(3): 69-70.
- [7] 廖宏勇, 张小纲. 信息编排设计[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011: 97-99. LIAO Hong-yong, ZHANG Xiao-gang. Information Design[M]. Beijing: Peking University Press, 2011: 97-99.
- [8] 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 Hui-shu, ZHUANG Da-min, MA Ding, et al. Design and Evaluation of Target Icons of the Cockpit Display Interface[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(10): 89-92.
- [9] 查尔斯·桑德斯·皮尔斯, 詹姆斯·雅各布·李斯卡. 皮尔斯: 论符号[M]. 赵星植, 译. 成都: 四川大学出版社, 2014: 56-59. PEIRCE S C, LISZKA J J. Peirce: On Signs[M]. ZHAO Xing-zhi, Translated. Chengdu: Sichuan University Press, 2014: 56-59.
- [10] 伊丽, 郭小朝, 李嵘, 等. 新型歼击机平视显示器指示符号优化实验研究[J]. 人类工效学, 2010, 16(3): 24-26. YI Li, GUO Xiao-chao, LI Rong, et al. Experimental Research on Optimizing the Display Symbols of HUD in Advanced Fighter[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2010, 16(3): 24-26.
- [11] 丁腾跃. 民用飞机飞行机组告警适航条款追踪分析[J]. 科技视界, 2015(26): 121. DING Teng-yue. Tracking Analysis of Civil Aircraft Flight Crew Warning Airworthiness Clause[J]. Science & Technology Vision, 2015(26): 121.
- [12] 弗拉基米尔·里苏欣. 控制飞行差错: 3 自动化[M]. 张航挺, 译. 北京: 中国民航出版社, 2003: 76-77.

- RISUKHIN V. Flight Error Control: 3 Automation[M]. ZHANG Hang-ting, Translated. Beijing: Civil Aviation Press of China, 2003: 76-77.
- [13] FRANEK J, KRESTA A. Judgment Scales and Consistency Measure in AHP[J]. Procedia Economics and Finance, 2014, 12: 164-173.
- [14] 边睦妍. 基于感性特征的钧窑瓷器设计元素提取及再设计应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
BIAN Mu-yan. Research on Extraction and Reuse of the Design Elements of Jun Porcelain Based on the Sensibility Features[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [15] 周德新, 田大成, 崔海青. 基于飞行阶段主飞行显示信息的重构策略[J]. 自动化与仪表, 2017, 32(8): 1-4.
ZHOU De-xin, TIAN Da-cheng, CUI Hai-qing. Reconfiguration Strategy of Primary Flight Display Information Based on Flight Phase[J]. Automation & Instrumentation, 2017, 32(8): 1-4.
- [16] 张磊, 庄达民, 颜吟雪. 飞机座舱显示界面编码方式[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(4): 466-469.
ZHANG Lei, ZHUANG Da-min, YAN Yin-xue. Encoding of Aircraft Cockpit Display Interface[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(4): 466-469.
- [17] 刘欣童, 廖晨阳, 陈岚, 等. 基于模糊层次分析法的导视系统布局研究[J]. 包装工程, 2021, 42(6): 258-264.
LIU Xin-tong, LIAO Chen-yang, CHEN Lan, et al. Overall Arrangement of Guide System Based on FAHP[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(6): 258-264.
- [18] 张磊, 庄达民. 飞机界面设计颜色匹配性[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(8): 1001-1004.
ZHANG Lei, ZHUANG Da-min. Color Matching of Aircraft Interface Design[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(8): 1001-1004.
- [19] 吕健, 孙玮伯, 潘伟杰, 等. 基于认知特性的信息界面布局美度评价[J]. 包装工程, 2019, 40(18): 220-226.
LYU Jian, SUN Wei-bo, PAN Wei-jie, et al. Evaluation of Information Interface Layout Beauty Based on Cognitive Characteristics[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(18): 220-226.
- [20] 洪诗莹, 宋方昊. 基于层次分析法的用户色彩偏向研究[J]. 包装工程, 2019, 40(22): 230-235.
HONG Shi-ying, SONG Fang-hao. User Color Preference Research Based on Analytic Hierarchy Process[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(22): 230-235.
- [21] 宋端树, 辜俊丽, 侯宏平, 等. 基于感性工学与 AHP 的老年人电动自行车造型设计[J]. 包装工程, 2019, 40(8): 130-135.
SONG Duan-shu, GU Jun-li, HOU Hong-ping, et al. Design of Electric Bicycle for Seniors Based on Perceptual Engineering and AHP[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(8): 130-135.

责任编辑: 陈作