

视觉认知视角下工业制造信息图符研究进展

吴晓莉^{1,2}, 宋杨¹, 张科², 牛佳然¹, 李凌霄¹

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

摘要: **目的** 随着信息技术的发展, 数字化、智能化的工业系统在企业生产安全、生产效率、节约成本等方面发挥着巨大作用。作为复杂信息的载体, 工业信息图符在智能化产线控制系统中起着重要作用, 符合视觉认知规律的工业信息图符设计可提高信息搜索的效率和准确度。**方法** 通过文献搜集和整理, 分析视觉认知视角下工业信息图符可视化研究进展, 从视觉认知理论和工业信息图符研究入手, 阐述相关研究成果。**结论** 总结了国内外视觉认知与工业信息图符的研究现状; 从感知特性、感知模型、感知技术三方面分析了视觉认知研究进展及方向; 从模式识别、模版匹配、特征分析、原型匹配四个维度探究了操作员视觉搜索机制; 从图符语义、图符定义与分类、图符设计原则、图符设计评价四个维度进行了相关研究; 研究了工业信息图符语义与实体的关联性; 从视觉标记机制出发, 提出了从信息特征、语义范畴和空间布局三个层面探讨工业信息图符设计的合理性与必要性。

关键词: 视觉认知; 工业制造; 信息图符; 研究范式

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)10-0064-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.10.010

A Review of Information Symbols of Industrial Manufacturing on Visual Cognition

WU Xiao-li^{1,2}, SONG Yang¹, ZHANG Ke², NIU Jia-ran¹, LI Ling-xiao¹

(1.Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2.Hohai University, Changzhou 213022, China)

ABSTRACT: With the development of information technology, digital and intelligent industrial systems play a huge role in production safety, production efficiency and cost saving in enterprises. As a carrier of complex information, industrial information symbols play an important role in intelligent production line control systems. Industrial information symbols designed in accordance with the laws of visual cognition can improve the efficiency and accuracy of information search. Literature collection and collation are conducted to analyse the progress of industrial information icon visualization research from the visual cognition perspective, starting from visual cognition theory and industrial information symbols research, to elaborate on the relevant research results. It summarizes the current status of research on visual cognition and industrial information graphical symbols at home and abroad, analyses the progress and direction of visual cognition research from three aspects: perceptual characteristics, perceptual models and perceptual technologies, explores the operator visual search mechanism from four dimensions: pattern recognition, template matching, feature analysis and prototype matching, and conducts relevant research from four dimensions: graphical symbol semantics, graphical symbol definition and classification, graphical symbol design principles and graphical symbol design evaluation. The study also investigates the correlation between the semantics of industrial information graphical symbols and entities, and proposes to explore the

收稿日期: 2021-02-26

基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目(BK20181159); 江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2019647); 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); 中央高校基本科研业务费重大基础研究专项(30920041114); 国家自然科学基金青年基金资助项目(71601068)

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, 主要研究方向为设计认知与信息可视化。

通信作者: 宋杨(1987—), 女, 河南人, 硕士, 南京理工大学助理研究员, 主要研究方向为创新设计。

rationality and necessity of industrial information graphical symbol design from three dimensions: information features, semantic categories and spatial layout from the visual marking mechanism.

KEY WORDS: visual cognition; industrial manufacturing; information symbols; research paradigms

随着智能制造信息集成化系统的普及,工业信息图符数量随之增多,图标复杂度的提升和图标语义指示不明会引发操作员的误判,因此能够正确表达自身含义的图标都必须具有较强的辨识度。针对工业信息图符进行准确、直观的设计,降低操作员的认知负荷,使其能够在极短时间内,获取界面上的有效图标信息并及时获得正确反馈是极为重要的。不合理的信息图符设计会加大操作员的认知负荷,甚至造成操作失误,从而引发生产事故,因此,对于智能制造信息图符的设计与验证,需要从多学科交叉领域探寻合理的研究范式。本文着重梳理了视觉认知视角下的信息图符可视化研究进展,从近年来国内外视觉认知、视觉搜索机制等方面,从图符语义、图符设计原则、图符设计评价等维度分析其研究进展,并提出工业制造信息图符可视化的研究范式,对工业制造数字化、信息化全面转型具有一定的参考意义。

1 视觉认知理论综述

1.1 国内外视觉认知研究进展及方向

现代认知心理学从 20 世纪 50 年代以后逐渐成为心理学研究的重要内容,该研究的最核心部分是对信息加工的研究,国外在认知理论的研究方面提出了很多的理论模型。Atkinson R C 等人^[1](1968 年)提出了信息加工模型。Sweller J 等人^[2](1997 年)首先通过信息加工模型提出了认知负荷理论,即当人的信息接收量超过记忆的容量值时,会形成认知负荷。Cooper A 等人^[3](2007 年)首先提出了认知摩擦理论,即人类在认知复杂信息系统规则时遇到的阻力。Linden S 等人^[4](2008 年)通过界面信息的设计扩展了用户在信息认知过程中认知能力的限制。Morita J 等人^[5](2011 年)根据人类对自动化的依赖,运用 ACT-R 认知模型制定了认知模块,提出了一种自动化的数字界面。Allison A 等人^[6](2011 年)研究了经验感知对视觉认知的影响所导致的搜索效率的变化。Wutz A 等人^[7](2013 年)讨论了时间缓冲在视觉信息认知过程中的作用。

国内学者近年来也从多方面对视觉认知进行了研究。在信息加工方面,潘毅^[8](2009 年)发现视觉系统加工信息的容量有限,不能同时感知和加工外界所有的视觉信息。李晶等人^[9](2016 年)由视觉信息获取角度分析了不同颜色之间的干扰程度,发现视觉信息获取程度可以作为视觉感知分层的依据。王海燕等人^[10](2016 年)得出了用户反应时间与图标元素的相关数据模型,以及视觉元素对用户的搜索策略的

表 1 视觉认知在“Web of Science”中的研究领域
Tab.1 Research field of visual cognition in “Web of Science”

研究方向	文献数量/篇	占比/%
心理学 Psychology	29170	67.231
生理学 Physiology	9046	20.849
计算机科学 Computer Sciences	3916	9.026
工程学 Engineering	2196	7.219

影响。在认知理论的应用方面,罗文超^[11](2013 年)提出了认知心理学结合可视化的应用,可建立起人类资源有限理论函数。官睿^[12](2015 年)通过 ERP 实验从认知心理学角度对布局改进提出了优化意见。在界面认知评价模型方面,汪海波等人^[13](2014 年)围绕信息视觉搜索和信息加工,提出了基于搜索深度—搜索广度、内敛度—发散度的数字界面认知评价模型。吴晓莉^[14-15](2017 年、2020 年)提出了交叉学科下的设计认知体系脉络及可视化表征方法;通过信息搜索的视觉生理指标实验,研究了工业信息交互界面的合理呈现与功能布局。上述文献表明,国内外对视觉认知过程进行了多方面的研究,无论是信息加工过程、认知负荷还是认知摩擦,都是学者在研究认知效率时提出的,因此对信息认知加工过程的研究有利于研究人的视觉搜索效率。

在“Web of Science”中对于视觉认知方面的研究主要集中在科学技术、社会科学及人文艺术方面,在 2010 至 2020 年间具体的研究领域中,除了在神经科学、行为科学以外的主要研究方向还包括心理学、生理学、计算机科学、工程学,见表 1。

近年来,在视觉认知方面更趋向于研究人脑的生理反应机能对行为影响的生理机制,以及内隐记忆和外显感官知觉之间的关系,人类心理或生理发病的感官病因的发掘;不同人群行为方式的感官差异性。在实际应用中大多研究产品的感官特性对感官的刺激。在未来对感知觉的研究中,虚拟现实等新兴科技因具有较强的交互性、互动性,有极大的潜力被应用于感官科学领域,是未来研究的趋势和方向。

国内近些年对“视觉认知”的研究主要集中在心理学、学前教育、医学疾病等领域。在中国知网中检索“视觉认知”的结果表明,在人机交互方向、自动化识别方向和计算机视觉方向是近些年来研究的趋势和主要方向,其主要学科领域的文献占比如表 2。

其中,“感知特性”、“感知模型”、“感知技术”是较为广泛的几个研究角度和主题。

表2 视觉认知在国内的研究领域
Tab.2 Research field of visual cognition in China

研究方向	文献数量/篇	占比/%
计算机软件及应用	1262	46.16
自动化技术	251	9.18
建筑科学与工程	230	8.41
电信技术	160	5.85

在感知特性方面,张宝等人^[16](2019年)根据人眼视锥感知细胞的分布特性,构建了人机交互界面视觉认知强度划分模型,构建了基于视觉认知特性的人机交互界面评价方法;邢大伟^[17](2018年)揭示了驾驶人视觉认知特征对于车辆操纵的引导机理,提出了实时的驾驶人预瞄时间求解方法,获得了实时的驾驶人视觉特征点位置,分析了不同的视觉认知策略对驾驶人车辆操纵的作用。在感知模型的构建方面,周晓光等人^[18](2019年)对所构建的飞行员角运动感知模型进行了仿真验证分析,仿真结果显示所构建的飞行员角运动感知模型,可有效解决持续载荷飞行模拟器角运动感知与视觉认知错配问题,为持续载荷飞行模拟器控制算法设计提供了理论参考。在感知技术方面,陈涛等人^[19](2017年)利用虚拟全景技术,结合多种格式的音频、图形文件嵌入方法,建设完成了具有互动功能的虚拟现实气象观测站平台;成超^[20](2017年)针对交通场景智能感知的需求特点,从数据融合的角度出发,研究了智能交通系统建设背景下,视听觉融合的交通场景的智能感知技术;杜铭浩^[21](2019年)基于常见的人类感知系统,研究了适用于机器人感知技术的传感器,使其拥有与人类更相似的感知能力和反应能力。

学者们致力于研究感知觉在人大脑的生理反应机能。随着科学技术的发展,更多学者开始关注人类心理或生理发病的感官病因的发掘,以及在社会不断发展的过程中,通过划分不同人群,探索其行为方式的感官差异性等。在实际应用中大多研究产品的感官特性对感官的刺激。在未来对感知觉的研究中,虚拟现实等新兴科技因具有较强的交互性、互动性,有极大的潜力被应用于感官科学领域。

1.2 视觉认知下的视觉搜索机制

操作员在进行视觉搜索时,视觉认知的视觉搜索机制分别为模式识别、模版匹配、特征分析、原型匹配。

1.2.1 模式识别

模式识别指的是在从信息刺激、信息获取到信息输入的整个过程中,人眼及人脑对信息的辨别。关于模式识别存在一些争议,模式识别是在整体识别的基础上引起的自上而下加工,还是在整体识别之后的部分识别所引起的自下而上加工。Palmer S E^[22](1975

年)通过面部特征识别实验证明了,在多数情况下,对部分和整体的解释在自上而下与自下而上两个方向上同步发生。Oommen B J等人^[23](2002年)提出机器模式识别有两种基本的模式识别方法,即统计模式识别和结构(句法)模式识别。王守觉^[24](2002年)用“仿生模式识别”理论及其“高维空间复杂几何形体覆盖神经网络”识别方法,对地平面刚体目标全方位识别问题作了实验,对各种形状相像的动物及车辆模型作了全方位8800次识别,结果正确识别率为99.75%,错误识别率与拒识率分别为0和0.25%。皮佑国等人^[25](2007年)提出了一种新的模式识别方法——认知模式识别,并对模式识别学科性质、机器模式识别存在问题和与人在模式识别方面存在的主要差异进行了讨论,并预测了认知模式识别的发展趋势。

1.2.2 模板匹配

模板匹配理论认为头脑中存在着许多不同事物所对应的模板,当个体面对着一个未知的刺激模式时,就将这个刺激模式与头脑中的模板一一比较,找出匹配程度最高的那个模板,从而完成模式识别。因此,模板匹配是一种简单的模式识别程序,它建立在将感觉信息的精确构型对应大脑的相应构型的基础上。Biederman I^[26](1987年)基于模板匹配理论,提出复杂形状都是由几何离子组成的,例如杯子是由圆柱体(容器部分)和椭圆形(手柄部分)组成的。Phillips W A^[27](1974年)通过实验证明了,当模式和模板的感觉记忆均存在时,两者能直接以感觉记忆编码进行匹配,但这类实验的条件与真实生活中的情形偏离较远,模式和模板的呈现方式受到苛刻的“三同”(位置、取向和大小均相同)限制,因此结果的局限性较大。马振玲等人^[28](2004年)通过抽样模式识别实验,取消了“三同”的限制,实验结果表明,不论位置、取向和大小如何,只要模式和模板的感觉记忆信息同时存在,它们就能直接以感觉记忆编码进行匹配。在实际生活中,模板和模式相继呈现的时间间隔通常远远超过感觉记忆的维持时间,因此它们的感覺记忆信息往往不可能同时存在,在这种情况下,模板和模式以哪种记忆编码方式进行匹配,无疑是一个更为重要的问题。

1.2.3 特征分析

特征分析理论认为人的头脑中,各种模式是以它们分解后得到的一系列特征的形式来表征的,模式识别的过程就是抽取当前刺激的各个方面的特征,然后与记忆中的各种模式的特征进行比较,找到最佳匹配。模式知觉是一种较高级的信息加工,在此之前,复杂的输入刺激首先要根据其自身的简单特征(Feature)得到识别。Yarbus A L^[29](1967年)通过实验表明,特征承载的信息越多,双眼停留其上的时间就越长,注视点的分布与被试的意图有关。常江等人^[30]

(2019 年)通过眼动实验分析得到了界面图标各属性对于信息搜索和识别的影响,实验表明图标的大小、形状、分布位置、分布密度和颜色都会对信息的搜索和识别产生一定影响。孙博文等人^[31](2019 年)提出色彩鲜明、对比明确、数量适中的色彩方案是用户获得良好舒适性的最好的设计方案,其对改善用户使用界面时的切换频率、选择时间、操作效率、信息辨识具有一定的作用。何含笑等人^[32](2019 年)研究了不同视角下,正面吊驾驶员视野形状特点及动态视觉搜索绩效,通过设定 4 种不同仰角下的动态视野形状测定实验和动态视觉搜索实验,说明仰角会对动态视觉搜索绩效产生影响。Cui Y^[33](2020 年)深入分析了设计图标和认知的各种因素,是如何影响顾客的注意力分布和认知负荷分布的,探索了顾客的视觉搜索特征和策略,了解了视觉注意力分布规律和视觉信息处理情况,形成了与图标设计和认知影响因素相关的视觉搜索模型。

1.2.4 原型匹配

长时记忆中存储着某种抽象的模式作为原型,而不是对无数种不同的模式形成特定的模板,甚至分解成各种特征。于是,一个模式就可以对照原型进行检验,如果发现相似之处,则该模式就得到了识别,这就是原型匹配理论。Brooks R^[34](1965 年)通过色彩编码的搜索实验分析了搜索时间绩效,结果表明增加 1~5 次显示颜色数量的方法不会对 S 的搜索时间造成很大影响,也没有揭示对于一个特定的项目多种颜色条件之间的任何差异,只要事先告诉他搜索的颜色。无论是使用的特定目标颜色来显示背景,还是包括这些变量在内的任何交互项,都没有任何统计上的显著影响。潘冬香^[35](2005 年)认为在认识范畴中,与原型完全匹配的图标特征识别强度最高,其他与原型近似性匹配的图标随着相似性的递减,特征识别强度也逐渐递减,认知范畴边缘的图标特征识别强度最弱。王雪皎^[36](2018 年)通过心理实验,提出了原型特征简化匹配模型,即图标特征识别强度最高的是认知范畴中特征简化的形象,随着图标复杂程度的增加,特征识别强度逐步减弱,高技术智能产品的图标特征识别强度最高的是认知范畴中造物原本的形态,随着高技术智能产品的演化与升级,特征识别强度逐步减弱。

操作员在进行视觉搜索时,主要基于模式识别、模版匹配、特征分析和原型匹配四个层面,信息的形状、色彩、布局等特征都是学者不断探究的要素,在最近几年中有许多学者从更多要素展开探索,并且更关注人在情感方面、深层需求下的交互方面的实验探究。

2 工业信息图符研究进展

随着智能制造产线控制系统的迭代更新,对各种

信息的显示需求越来越大,将海量的信息迅速传达给操作员成为众多学者的研究重点,而图标就是一种高效的信息呈现载体。在图标的可视化设计及验证方面,国内外学者分别从图符语义研究、图符定义与分类、图符设计原则、图符设计评价四个维度进行了大量的相关研究。

2.1 图符语义研究

在图符语义研究层面,Fisiak J^[37](1981 年)指出,可以将语言对比研究分为理论对比语言学和应用对比语言学。从认知语言学方面来看,它属于认知语言学的范畴。Wierzbicka A^[38](1996 年)通过研究指出语义元实际上意为抽象,是自然语义元语言理论中非常关键的概念。陆国栋等人^[39](2000 年)将工程图标的投影表达过程区分为三种语义,并细化了每个语义层次的表达深度和需要。Liu W^[40](2000 年)利用用户反馈的查询结果进行了语义的修改与标注,并提出了一种半自动标注图形语义的策略。Luo J A 等人^[41](2005 年)利用 Bayes 网络对底层特征和高层特征进行了结合,以便于更好地理解图像语义。Aksoy S K 等人^[42](2005 年)在图像的区域分割、分类过程中采用了 Bayes 分类器,通过训练用户指定的正负例句,得到了语义特征。文旭^[43](2007 年)基于认知语言学,探讨了语义认知语言学,而后从详细程度、视角、勾勒、心理扫描这四个维度进行了探讨,提出了对语义分析来说这些理解方法的重要性。孔德明等人^[44](2009 年)从语义学的角度出发,研究了符号图形,在语言学理论和生理学理论的指导下,把握事物的主要矛盾,从不同方面探讨了符号图形的语义学构建的主要问题。张婷婷^[45](2010 年)采用了定量综述的形式,分析了图标认知研究中的实验变量、研究目的等,得出图标认知研究设计的变量较多,涉及图标属性、图形特征等。刘琦玮等人^[46](2011 年)主要从语言的价值和图形本身出发,探讨了视觉符号语言语义对标志设计的影响。宋钊^[47](2011 年)以修辞学与认知模型的角度为基础,从隐喻的角度着手研究了图形的创造性,为揭示图形形式语义的发展规律做好了准备。袁凤^[48](2011 年)主要通过心理学相关知识,并结合人在视觉上的体验和相关材料,探讨了图形的艺术性与传达性之间的关联性和匹配程度。刘佳等人^[49](2018 年)基于判断结构的隐喻语义分析表明,隐喻的整体意义是基于语言使用者的认知价值取向形成新的显性结构,再通过另外的分析机制所实现的,并提出语义类比或语义实现是在判断中根据比较普遍的关系或相类似的关系进行的。邹攀宇^[50](2019 年)依照人们平时心理活动的水平,以动态图形设计为前提,将用户在图形符号语义上的认知划分为为了知觉、经验、情绪或思维三个层次,并将这三个层次作为建构图形的语义信息的基本要素。陈

晓燕^[51](2019年)通过对Langacker认知语法的研究,主要从认知的角度入手,针对语言结构进行了合理的定义与框架的搭建,探索了认知语法观、认知观、语义观等,成为研究者掌握整个认知语法的先决条件。

2.2 图符定义与分类

在图符定义与分类层面,Smith DC^[52](1975年)将图标定义为用图形表示的一种生动形象的描述。索绪尔^[53](1980年)将符号图标分为图像符号、标志符号和真正符号三大类。Heim S^[54](2008年)将图标定义为设计师和用户都能理解的语言。Ma X等人^[55](2015年)根据图标的使用目的,将图标分为了动作型图标和知识型图标。章莉莉^[56](2017年)从图形的样式出发,将图标分为了具象图标、象形图标和抽象图标。刘立明^[57](2019年)从图标呈现形式的角度出发,将图标分为了拟物图标和扁平图标。汪兰川等人^[58](2018年)从功能属性上将图标分为了启动图标和工具栏图标。严寒,吴晓莉^[59](2020年)将工业信息图符按照风格来分类,主要分为了面形图标、线性图标(直角、圆角、断点、线面结合)、拟物图标(写实拟物、轻拟物)和3D图标,具体分类示例,见表3。

张科,吴晓莉^[60](2021年)将工业信息图符按照语义范畴进行了分类,从生产加工、工业设备、信息监控、安全警示四个方面,将工业图标分为了生产类图标、设备类图标、监控类图标、警示类图标,具体分类示例,见表4。

2.3 图符设计原则

在图符设计原则层面,Isherwood S等人^[61](2009年)发现了影响图标可用性的三个因素(用户对图标的理解、设计师想传达的意义、图标功能)之间的关系。方学兵等人^[62](2010年)从认知心理学和符号学的角度出发,深入探讨了图标设计原则。周煜啸等人^[63](2012年)从语意、语构、语境、语用四个维度分析了图标,提出了基于符号学的图标设计方法与流程。李长春等人^[64](2012年)指出在设计图形、色彩、形式时,需要考虑情感的表达。Morson S^[65](2014年)提出在设计图标时,应尽量去除多余的装饰,只保留重要的视觉元素,提高图标的简洁性。Thomas G^[66](2014年)通过调查发现,添加适当的阴影和层次,可以提高图标的视觉表现力,增加用户点击率。薛澄岐^[67](2015年)提出了五个图标设计准则:精准识别、设计规范、外形美观、风格统一、顺应时代趋势。李道源等人^[68](2018年)提出,拟物化风格是通过添加更多的效果来进行设计的,而扁平化风格主要是通过简化的方式来体现的。

2.4 图符设计评价

在图符设计评价层面,LinR^[69](1994年)为了

表3 图标风格分类
Tab.3 Icon style classification

风格分类	图示
面形图标	
直角线性图标	
圆角线性图标	
断点线性图标	
线面结合图标	
拟物图标	<p>写实拟物图标 </p> <p>轻拟物图标 </p>
3D图标	

表4 图标范畴分类
Tab.4 Icon category classification

风格分类	图示
生产类图标	
设备类图标	
监控类图标	
警示类图标	

探讨合理的图标设计样式,用实验来验证并分析了图标的识别性和混淆性。Mueller C等人^[70](2007年)利用图形排序算法对视觉相似性矩阵数据进行了可视化分析。Huang C等人^[71](2007年)通过实验分析了图标识别效率和图标形态之间的关系,结果表明,在图标的认知上设计师和用户的想法不完全一致。Lim Y P等人^[72](2009年)对图标色彩进行了实验分析,探究了更优的图标色彩设计。李洋等人^[73](2012年)以医院图标为例,通过特征模板匹配法,将距离算法与颜色特征结合,对特殊图标进行了精准识别。Khairi R等人^[74](2013年)研究了在现实环境下,如何实现数据集的图标可视化表达。牛亚峰等人^[75](2014年)研究了不同时间压力(4000 ms、2000 ms)和不同图标数量(3个图标、5个图标、10

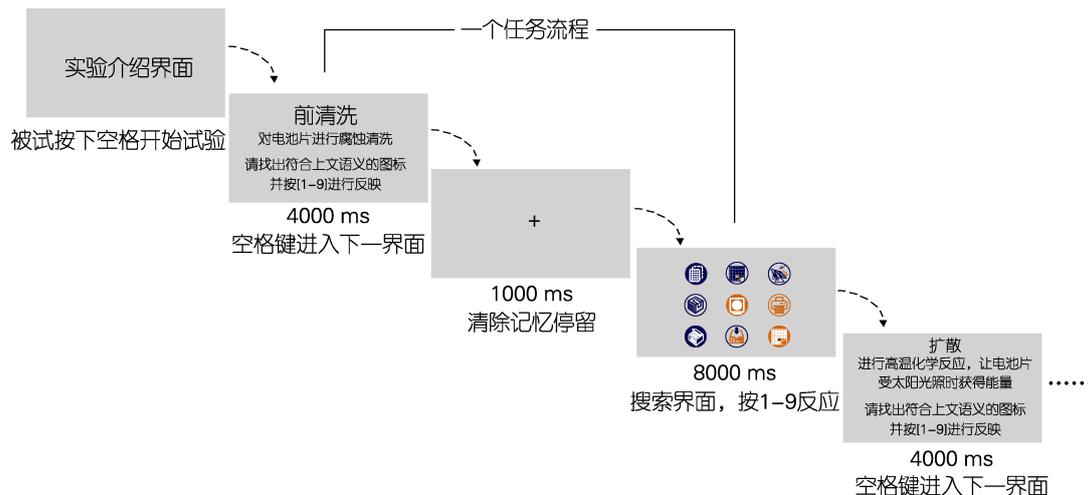


图 1 工业图符语义认知实验流程

Fig.1 Experimental flow of semantic cognition of industrial symbols

个图标)下的图标记忆。金涛等人^[76](2014年)通过实验证明了警示性图标在语义图标实验中的注意捕获效应,归因于其本身携带的语义信息。Burmistrov I 等人^[77](2015年)研究了图标、字体和布局等的识别效率,发现传统界面元素视觉搜索效率高于扁平化设计元素。邵将等人^[78](2015年)通过实验发现,在头盔瞄准显示界面中,图标的不同特征能够显著影响图标搜索效率。王海燕等人^[79](2016年)发现线框粗细变化对用户搜索绩效有影响,用户始终依据色彩特征及形状特征进行信息搜索。张雄飞等人^[80](2017年)提出了从图标呈现、图标语义、图标认知三个角度研究图标复杂度。彭宁玥等人^[81](2017年)采用视觉搜索实验范式,比较了不同特征推理条件对各测量指标的影响,得出语义词引导下的目标搜索正确率最高。袁浩等人^[82](2018年)通过眼动实验探究了不同尺寸扁平化手机图标对视觉搜索效率的影响。孙阳等人^[83](2018年)通过分析警示标识中的图形、色彩等元素及其语义,探讨了视觉语义在警示标识设计中的运用。张伟伟,吴晓莉等人^[84](2019年)基于图标语义及设计原则,从颜色、形状、背景三种图标特征形式出发,对图标的形式选择进行了实验研究。吴晓莉等人^[85](2019年)以信息特征及呈现方式为变量,展开了视觉搜索实验,结果表明,图标形态和信息呈现方式对视觉搜索均具有显著性影响,凝视/扫视时间及路径能够反映图标形态的复杂程度及信息呈现的难易程度。严寒,吴晓莉等人^[86](2020年)针对国内外工业信息图符进行了指示性、安全性、色彩性等语义研究,分析了工业信息图符符号语义与实体的具体关联性。吴晓莉^[87]等人(2021年)研究了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。

在对工业信息图符进行实验探究时,严寒^[59](2020年)通过图标可视化行为实验,研究了工业图标多种设计因素的交叉组合变化对被试信息获取

效率的影响和图标设计的合理性,实验安排如下。

1) 实验自变量(刺激变量):图标的颜色(包含单色系与双色系)、背景、9个工业图标。

2) 实验因变量(反应变量);用户的反应正确率和反应时间。

3) 视觉搜索时间限定:实验为了防止被试因未看见或者忘记靶目标的文字(语义)描述而寻找不到靶目标图标,设定需搜索的图标界面显示时间为8s。一旦用户8s后还未做出反应,实验界面将自动跳入下一靶目标的文字(语义)描述。工业图符语义认知实验流程见图1。

对工业信息图符的研究已经取得了一定成果,学者们从图符语义研究、图符定义与分类、图符设计原则、图符设计评价四个维度进行了相关研究。然而研究的视角及重心都集中在流行趋势下的图标设计研究,在工业信息图符领域的设计与评估研究较少,对工业信息图符的可视化设计没有准确的指导原则,在工业信息图符的设计评价方面也缺乏有效的实验范式。在后续对工业信息图符的研究中,可从上述两个层面展开。

3 工业制造信息图符可视化的研究范式

3.1 工业信息图符语义与实体关联性

严寒^[59](2020年)将工业图标结合了“能指”与“所指”的概念和“本体”与“喻体”的概念,分析了图标中的隐喻修辞手法,而后对其生产线图标进行了视觉上的可视化设计。“能指”指图标、图形的外在形象,“所指”指图标所代表的操作行为。“本体”一般是需要设计师借用一定视觉形象予以展现的虚拟的数字信息,而“喻体”主要是为了展现该数字信息而较多采用的一个内在相关联的视觉形象。所谓虚拟的数字信息则是数字界面中由像素点组成的图形符号,可见而无可触摸。

表5 生产工序相关的信息图符可视化(部分)
Tab.5 Visualization of information graph related to production process (partial)

工序图符	喻体的能指	喻体的所指	本体的能指	本体的所指
 <p>前清洗</p>	电池片、箭头和手	向左的箭头代表“前”，手在电池片上擦拭(清洗)	虚拟的数字信息	清洗电池片
				
采用电池片、箭头和手自身具有的视觉形象符号特征的组合,以及有方向性的指示操作,表示流程中对电池片进行腐蚀清洗的操作				
 <p>扩散</p>	电池片和太阳	太阳照着电池片	虚拟的数字信息	太阳对电池片进行高温照射的行为
				
采用电池片和太阳照射光线自身具有的视觉形象符号特征的组合,表示将磷元素通过高温化学反应生成PN结,让电池片受太阳光照时获得能量,进行电子跃迁的操作流程				

以生产工序相关的符号隐喻语义,在工业生产流程中,符号隐喻具体表现为工业工序外观等,行为隐喻表现为直接操作,后者也被称为“手动启示”。简单地说,一个是告诉用户是什么,一个是告诉用户怎么用。工序图标主要是以符号隐喻语义为主进行分析设计,生产工序相关的信息图符可视化(部分)见表5。

在生产工序的图标设计中,大多使用象征符号来进行语义的表达,设计师在设计这类图标时,应该注意摒弃华丽的视觉效果,减少过分的修饰,以明确、精准的简化形式为主。

3.2 工业信息图符的视觉标记机制

Watson D G 等人^[88](1997年)提出视觉标记是对先出现项目的位置做标记,这些位置受到抑制,从而使后出现的项目获得优先选择。Humphreys G 等人^[89](2004年)通过实验发现当目标物颜色与干扰物颜色相同时,视觉搜索效率降低,证明在视觉搜索中产生了基于干扰物颜色的抑制。Hodsoll J P 等人^[90](2005年)采用预搜索实验范式来验证空间结构抑制,实验结果表明,当旧项目和目标物具有特定空间结构时,重复旧项目,出现预览效应。张科^[59](2021年)发现视觉标记的四种抑制机制(位置抑制、特征抑制、空间结构抑制、范畴抑制)与工业信息图符的三种主要表现形式(信息特征、语义范畴、空间布局)具有一定的关联性。基于此关联性,在研究视觉标记机制可展开的工业信息图符实验分析时,可将视觉标记的抑制机制与工业信息图符的表现形式结合再进行对比分析。

基于上述研究,目前可开展的研究为结合视觉标记的相关实验范式(预搜索范式),探究工业图标的视觉搜索认知规律,将视觉标记的研究范围从实验心

理学领域拓展至工业图标认知领域,拓展视觉标记理论的应用范围。在后续研究中,可以开展以信息特征、语义范畴、空间布局为视觉标记的工业图标视觉搜索实验,来探究工业图标视觉搜索实验中是否会出现特征抑制、范畴抑制、空间布局抑制,以及不同信息特征、不同语义范畴、不同空间布局对操作员视觉搜索效率的影响。

以信息特征研究为例,在采用具体实验范式对工业信息图符进行实验探究时,可通过视觉标记理论中的预搜索实验范式,选取信息特征作为实验变量,设计目标搜索任务,开展心理学行为反应实验,探究图标风格(扁平、2.5D)、复杂程度(简单、复杂),任务难度(6级、9级、12级)对工业图标搜索效率的影响,实验安排如下。

- 1) 实验自变量(刺激变量):图标风格(扁平、2.5D),复杂程度(简单、复杂),任务难度(6级、9级、12级)。
- 2) 实验因变量(反应变量);被试的反应时间。
- 3) 进入实验,出现第一张实验介绍界面,按任意键进入任务流程,首先出现目标图标界面,3000 ms后出现遮蔽界面,1000 ms后出现干扰物界面,3000 ms后出现任务搜索界面,任务搜索时间为5000 ms,找到按“1”,未找到按“0”,至此一个任务流程结束,共有24个任务流程,实验流程见图2。

在研究视觉认知视角下的工业信息图符可视化时,可以对工业图标进行“能指”与“所指”的概念和“本体”与“喻体”的概念的结合,分析图标中的隐喻修辞手法,进而对工业图标进行可视化设计。在对工业信息图符进行实验评价时,可采用视觉标记理论中的预搜索实验范式,从信息特征、语义范畴、空间布局三个角度对工业图标进行实验分析与评价。

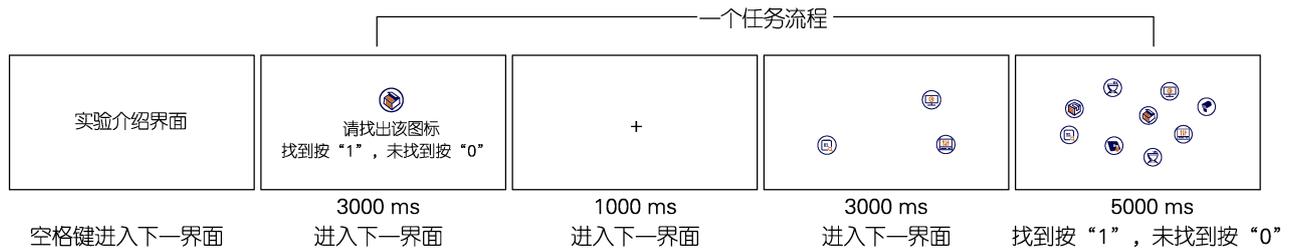


图 2 信息特征研究实验流程

Fig.2 Experimental flow of information characteristics research

4 结语

从相关领域的发展和研究现状可以看出,视觉认知视角下的工业信息图符可视化研究领域积累了丰富的研究经验与研究成果。在视觉认知研究领域,学者们研究了视觉认知的反应机理与视觉搜索机制,视觉认知的研究主要集中在实验领域,而在应用领域较少,尤其是在工业信息图符领域中的研究较少,对视觉认知机制在新领域的研究与讨论应继续深入。此外,工业信息图符的主要呈现形式包括信息特征、语义范畴及空间布局。如何针对工业信息图符的现状,从上述三个维度对当前的工业信息图符进行实验探究,构建合理的工业信息图符设计流程,对当前的工业信息图符进行设计改良,使其高效准确地应用在智能制造领域,还有待进一步研究与分析。

参考文献:

- [1] ATKINSON R C, SHIFFRIN R M. Human Memory: a Proposed System and Its Control Processes[J]. *The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory*, 1968(2): 89-195.
- [2] SWELLER J, JEROEN J, G VAN M, et al. Cognitive Architecture and Instructional Design[J]. *Educational Psychology Review*, 1997, 10(3): 251-296.
- [3] COOPER A. About Face3: the Essentials of Interaction Design[M]. John Wiley & Sons Inc: Hoboken, 2104.
- [4] LINDEN S, CREMERS A H M. Cognitive Abilities of Functionally Illiterate Persons Relevant to ICT Use[C]. Linz: 11th International Confererce, 2008.
- [5] MORITA J, MIWA K, MAEHIGASI A, et al. Modeling Human-Automation in a Unifited Cognitive Architecture[C]. Sundance: 20th Behavior Representation in Modeling & Simulation, 2011.
- [6] ALLISON A, BRENNAN, MARCUS R, et al. Person Perception Informs understanding of Cognition during Visual Search[J]. *Atten Percept Psychophys*. 2011, 73: 1672-1693.
- [7] WUTZ A, MELCHER D. Temporal Buffering and Visual Capacity: the Time Course of Object Formation Underlies Capacity Limits in Visual Cognition[J]. *Atten Percept Psychophys*, 2013, 75: 921-933.
- [8] 潘毅. 基于工作记忆内容的视觉注意捕获及其自动性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- PAN Yi. Visual Attentional Capture and Its Automaticity Based on Working Memory[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [9] 李晶, 薛澄岐. 基于视觉感知分层的数字界面颜色编码研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(24): 201-208.
- LI Jing, XUE Cheng-qi. Digital Interface Color Coding Based on Visual Perception Hierarchy[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(24): 201-208.
- [10] 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. ACT-R Cognitive Model Analysis of Visual Icon Search Behavior[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, 28(10): 1740-1749.
- [11] 罗文超. 基于认知心理学的可视化管理选择与应用研究[J]. *科技资讯*, 2013(13): 150-152.
- LUO Wen-chao. Selection and Application of Visual Management Based on Cognitive Psychology[J]. *Science and Technology Information*, 2013(13): 150-152.
- [12] 官睿. 基于 ERP 技术的界面信息认知和布局研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- GUAN Rui. Interface Information Cognition and Layout Based on ERP Technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [13] 汪海波, 薛澄岐, 史铭豪. 自动化影响下的复杂系统数字界面设计研究[J]. *包装工程*, 2014, 35(4): 36-39.
- WANG Hai-bo, XUE Cheng-qi, SHI Ming-hao. Digital Interface Design of Complex System under the Influence of Automation[J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(4): 36-39.
- [14] 吴晓莉, 周丰. 设计认知——研究方法与可视化表征[M]. 南京: 东南大学出版社, 2020.
- WU Xiao-li, ZHOU Feng. Design Cognition: Research Methods and Visual Representation[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2020.
- [15] 吴晓莉. 复杂信息任务界面的出错——认知机理[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- WU Xiao-li. Error Analysis of Complex Information Task Interface: a Cognitive Mechanism[M]. Beijing:

- Science Press, 2017.
- [16] 张宝, 刘俊霞, 王小萌. 基于视觉感知特性的人机交互界面评价[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(12): 1592-1596.
ZHANG Bao, LIU Jun-xia, WANG Xiao-meng. Evaluation of Human-Computer Interaction Interface Based on Visual Perception[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 42(12): 1592-1596.
- [17] 邢大伟. 驾驶人视觉感知特性及其建模研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
XING Da-wei. Driver's Visual Perception Characteristics and Its Modeling[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [18] 周晓光, 赵仁厚, 王鹏, 等. 飞行员角运动感知模型研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(8): 77-81.
ZHOU Xiao-guang, ZHAO Ren-hou, WANG Peng, et al. Pilot Angle Motion Sensing Model[J]. Computer Simulation, 2019, 36(8): 77-81.
- [19] 陈涛, 沈岳峰, 胡潮, 等. 基于全景视觉感知技术的虚拟气象观测场科普平台设计[C]. 合肥: 第35届中国气象学会年会, 2018.
- [20] 成超. 视听觉融合的交通场景智能感知技术研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
CHENG Chao. Intelligent Sensing Technology for Traffic Scenes Based on Visual and Audio Fusion[D]. Xiamen: Xiamen University, 2017.
- [21] 杜铭浩. 机器人感知技术及其简单应用[J]. 数字通信世界, 2019(2): 176-177.
DU Ming-hao. Robot Perception Technology and Its Simple Application[J]. Digital Communications World, 2019(2): 176-177.
- [22] PALMER S E. Visual Perception and World Knowledge: Notes on a Model of Sensory Cognitive Interaction[M]. San Francisco: Freeman, 1975.
- [23] OOMMEN B J, RUEDA L G. Using Pattern Recognition Techniques to Derive a Formal Analysis of Why Heuristics Functions Work[C]. Alicante: International Workshop on Pattern Recognition in Information Systems, 2002.
- [24] 王守觉. 仿生模式识别(拓扑模式识别)——一种模式识别新模型的理论与应用[J]. 电子学报, 2002, 30(10): 1417-1420.
WANG Shou-jue. Bionic Pattern Recognition (Topological Pattern Recognition): Theory and Application of a New Pattern Recognition Model[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(10): 1417-1420.
- [25] 皮佑国, 梁添才. 认知模式识别理论与研究[J]. 深圳信息职业技术学院学报, 2007, 5(2): 60-63.
PI You-guo, LIANG Tian-cai. Theory and Research on Cognitive Pattern Recognition[J]. Journal of Shenzhen Institute of Information Technology, 2007, 5(2): 60-63.
- [26] BIEDERMAN I. Recognition by Components: a Theory of Human Image Understanding[J]. Psychological Review, 1987, 94: 147.
- [27] PHILLIPS W A. On the Distinction between Sensory-storage Age and Short-Term Visual Memory[J]. Perception and Psychology, 1974, 16: 283-290.
- [28] 马振玲, 杨仲乐. 视觉感觉记忆信息在模式识别中的作用[J]. 心理科学, 2004, 27: 624-627.
MA Zhen-ling, YANG Zhong-le. The Role of Visual Sensory Memory Information in Pattern Recognition[J]. Psychological Science, 2004, 27: 624-627.
- [29] YARBUS A L. Eye Movements during Perception of Complex Objects[J]. Eye Movements & Vision, 1967.
- [30] 常江, 徐小哲, 巩雪. 基于眼动实验的智能设备界面图标设计优化[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2019, 35(4): 426-430.
CHANG Jiang, XU Xiao-zhe, GONG Xue. Design Optimization of Intelligent Device Interface Icon Based on Eye Movement Experiment[J]. Journal of Harbin University of Commerce: Natural Science, 2019, 35(4): 426-430.
- [31] 孙博文, 杨建明, 孙远波, 等. 基于眼动实验的车辆人机界面色彩设计研究[J]. 包装工程, 2019, 40(2): 23-30.
SUN Bo-wen, YANG Jian-ming, SUN Yuan-bo, et al. Color Design of Vehicle Human-Machine Interface Based on Eye Movement Experiment[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(2): 23-30.
- [32] 何含笑, 张守宝, 盛进路. 基于不同仰角的正面吊驾驶员动态视觉搜索绩效研究[J]. 人类工效学, 2019, 25(3): 20-25.
HE Han-xiao, ZHANG Shou-bao, SHENG Jin-lu. Dynamic Visual Search Performance of Frontal Crane Drivers Based on Different Elevation Angles[J]. Ergonomics, 2019, 25(3): 20-25.
- [33] CUI Y. Advertising Icon Design and Communication Conception Under the Condition of EEG and Eye Movement Experiments-Taking the Lingmei Omnimedia E-Commerce Platform Mobile APP as an Example[M]. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020.
- [34] BROOKS R. Search Time and Color Coding[J]. Psychonomic Science, 1965, 2(1-12): 281-282.
- [35] 潘冬香. 原型理论的认知心理学诠释[J]. 武汉理工大学学报(社会科学版), 2005, 18(4): 512-514.
PAN Dong-xiang. A Cognitive Psychology Interpretation of Prototype Theory[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Social Science Edition), 2005, 18(4): 512-514.
- [36] 王雪皎. 图标特征识别强弱的原型匹配模型研究[J]. 装饰, 2018, 305(9): 100-102.
WANG Xue-jiao. Prototype Matching Model of Icon Feature Recognition Strength[J]. Zhuangshi, 2018, 305(9): 100-102.
- [37] FISIAK J. Theoretical Issues in Contrastive Linguistics

- tics[M]. Amsterdam: John Benjamins, 1981.
- [38] WIERZBICK A A. Semantics: Primes and Universals[M]. Oxford: Oxford University Press, 1996.
- [39] 陆国栋, 晏群, 彭群生. 面向图形理解的工程语义研究[J]. 中国图象图形学报, 2000(10): 67-73.
LU Guo-dong, YAN Qun, PENG Qun-sheng. Engineering Semantics for Graphics Understanding[J]. Journal of Image and Graphics, 2000(10): 67-73.
- [40] LIU W Y, SUN Y, ZHANG H. MiAlbum: a System for Home Photo Management Using the Simi-Automatic Image Annotation Approach[C]. Los Angeles: ACM Press, 2000.
- [41] LUOJA, SAVAKIS E. A Bayesian Network-Based Framework for Semantic Image Understanding[J]. Pattern Recognition, 2005, 38: 919-934.
- [42] AKSOYS, KOPERSKI K. Learning Bayesian Classifiers for Scene Classification with a Visual Grammar[J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2005, 43(3): 581-589.
- [43] 文旭. 语义、认知与识解[J]. 外语学刊, 2007(6): 35-39.
WEN Xu. Semantic Meaning, Cognition and Construal Understanding[J]. Chinese Journal of Foreign Languages, 2007(6): 35-39.
- [44] 孔德明, 刘淑玲. 标志图形的语义性研究[J]. 设计艺术(山东工艺美术学院学报), 2009(1): 51-52.
KONG De-ming, LIU Shu-ling. The Semantic Research of Logo Graphics[J]. Art of Design (Journal of Shandong Institute of Arts and Crafts), 2009(1): 51-52.
- [45] 张婷婷. 图标认知实验定量研究综述[J]. 艺术与设计(理论), 2010, 2(12): 240-242.
ZHANG Ting-ting. A Review of Quantitative Research on Icon Cognition[J]. Art and Design (Theory), 2010, 2(12): 240-242.
- [46] 刘琦炜, 赵晓明. 现代标志设计中图形视觉符号语言语义的研究[J]. 电影评介, 2011(20): 87-88.
LIU Qi-wei, ZHAO Xiao-ming. The Semantics of Visual Symbol Language in Modern Logo Design[J]. Film Review, 2011(20): 87-88.
- [47] 宋钊. 基于隐喻的图形语义研究[J]. 浙江理工大学学报, 2011, 28(2): 209-212.
SONG Zhao. Graphic Semantics Based on Metaphor[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2011, 28(2): 209-212.
- [48] 袁凤. 语义图形[J]. 中华民居, 2011(3): 16-17.
YUAN Feng. Semantic Graphics[J]. Chinese Residential Buildings, 2011(3): 16-17.
- [49] 刘佳, 刘世理. 基于判断句式分析的隐喻语义认知价值取向[J]. 解放军外国语学院学报, 2018, 41(1): 48-56.
LIU Jia, LIU Shi-li. The Cognitive Value Orientation of Metaphor Semantic Based on Judicial Construction Analysis[J]. Journal of PLA Institute of Foreign Lan-
guages, 2018, 41(1): 48-56.
- [50] 邹攀宇. 动态图形设计中图形元素的符号语义建构[J]. 家具与室内装饰, 2019(10): 114-116.
ZOU Pan-yu. Symbolic Semantic Construction of Graphic Elements in Dynamic Graphic Design[J]. Furniture and Interior Decoration, 2019(10): 114-116.
- [51] 陈晓燕. 认知语法的“三观”及其语义描写工具[J]. 宜春学院学报, 2019, 41(7): 82-85.
CHEN Xiao-yan. “Three Views” of Cognitive Grammar and Its Semantic Description Tools[J]. Journal of Yichun University, 2019, 41(7): 82-85.
- [52] SMITH D C. Pygmalion: a Creative Programming Environment[D]. Stanford: Stanford University, 1975.
- [53] 索绪尔通语言. 普学教程[M]. 北京: 商务印书馆, 1980.
Saussure General Learning Course[M]. Beijing: The Commercial Press, 1980.
- [54] HEIM S. 和谐界面——交互设计基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
HEIM S. Harmonious Interface: Basis of Interaction Design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [55] MA X, MATTA N, CAHIER J P, et al. From Action Icon to Knowledge Icon: Objective-Oriented Icon Taxonomy in Computer Science[J]. Displays, 2015, 39: 68-79.
- [56] 章莉莉. 标志设计——通向专业设计之路[J]. 纺织服装教育, 2017, 32(4): 289.
ZHANG Li-li. Logo Design: the Road to Professional Design[J]. Textile and Clothing Education, 2017, 32(4): 289.
- [57] 刘立明. 图形化用户界面图标的发展趋势探究[J]. 中国标准化, 2019(4): 233-234.
LIU Li-ming. The Development Trend of Graphical User Interface Icon[J]. China Standardization, 2019(4): 233-234.
- [58] 汪兰川, 刘春雷. UI图标设计: 从入门到精通[M]. 第2版. 北京: 人民邮电出版社, 2018.
WANG Lan-chuan, LIU Chun-lei. UI Icon Design: from Entry to Proficient[M]. 2nd Edition. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2018.
- [59] 严寒. 智能化产线控制系统的图标语义认知与信息可视化设计[D]. 常州: 河海大学, 2020.
YAN Han. Icon Semantic Cognition and Information Visualization Design of Intelligent Production Line Control System[D]. Changzhou: Hohai University, 2020.
- [60] 张科. 基于视觉标记的工业图标认知规律实验及设计应用[D]. 常州: 河海大学, 2021.
ZHANG Ke. Experiment and Design Application of Cognitive Law of Industrial Icons Based on Visual Mark[D]. Changzhou: Hohai University, 2021.
- [61] ISHERWOOD S. Graphics and Semantics: the Relationship between What is Seen and What is Meant in Icon Design[J]. Lecture Notes in Artificial Intelligence,

- 2009, 5639: 197-205.
- [62] 方学兵, 韩春明. 信息界面中的图标符号设计原则[J]. 淮南师范学院学报, 2010, 12(2): 65-67.
FANG Xue-bing, HAN Chun-ming. Design Principles of Icon Symbols in Information Interface[J]. Journal of Huainan Normal University, 2010, 12(2): 65-67.
- [63] 周煜嘯, 罗仕鉴, 陈根才. 基于设计符号学的图标设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(10): 1319-1328.
ZHOU Yu-xiao, LUO Shi-jian, CHEN Gen-cai. Icon Design Based on Design Semiotics[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(10): 1319-1328.
- [64] 李长春, 刘艳. 基于标志设计的心理语义解读[J]. 包装世界, 2012(1): 88-89.
LI Chang-chun, LIU Yan. Psychological Semantic Interpretation Based on Logo Design[J]. Packaging World, 2012(1): 88-89.
- [65] MORSON S. iOS 7 and Flat Design[M]. Apress, 2014.
- [66] THOMAS G. How Flat Design Increases Conversion Rates[EB/OL]. (2014-09-17)[2021-02-15]. <https://speckyboy.com/2014/09/17/flat-design-increases-conversion-rates/>.
- [67] 薛澄岐. 复杂信息系统人机交互数字界面设计方法及应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2015.
XUE Cheng-qi. Design Method and Application of Human-computer Interaction Digital Interface in Complex Information System[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2015.
- [68] 李道源, 孙立, 吴丹. UI 图标设计[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2018.
LI Dao-yuan, SUN Li, WU Dan. UI Icon Design[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2018.
- [69] LIN R. A Study of Visual Features for Icon Design[J]. Design Studies, 1994, 15(2): 185-197.
- [70] MUELLER C, MARTIN B, LUMSDAINE A. A Comparison of Vertex Ordering Algorithms for Large Graph Visualization[C]. Sydney: Asia/Pacific Symposium on Visualisation, 2007.
- [71] HUANG C, TSAI CM. The Effect of Morphological Elements on the Icon Recognition in Smart Phones[J]. Communications in Computer and Information Science. 2007, 4559(1): 513-522.
- [72] LIM Y P, WOODS P C. Experimental Color in Computer Icons[J]. Visual Information Communication, 2009: 149-158.
- [73] 李洋, 张晓冬, 鲍远律. 基于特征模板匹配识别地图中特殊图标的方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012(7): 605-609.
- [74] KHAIRI R, ALESSANDRO F I, AARON K. Visualizing Large, Heterogeneous Data in Hybrid-Reality Environments[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2013, 33(4): 38-48.
- [75] 牛亚峰, 薛澄岐, 李雪松. 基于事件相关电位的不同时间压力和数量下的图标记忆[J]. 东南大学学报(英文版), 2014(1): 45-50.
NIU Ya-feng, XUE Cheng-qi, LI Xue-song. Icon Memory Based on Event-Related Potentials under Different Time Pressure and Number[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2014(1): 45-50.
- [76] 金涛, 薛澄岐, 王海燕, 等. 数字图形界面态势感知的评测方法研究[J]. 工程设计学报, 2014, 21(1): 87-91.
JIN Tao, XUE Cheng-qi, WANG Hai-yan, et al. Evaluation Method of Digital Graphical Interface Situational Awareness[J]. Journal of Engineering Design, 2014, 21(1): 87-91.
- [77] BURMISTROV I, ZLOKAZOVA T, IZMALKOVA A, et al. Flat Design vs Traditional Design: Comparative Experimental Study[C]. Mumbai: INTERACT 2015-Ifp Tc 13 International Conference, 2015.
- [78] 邵将, 薛澄岐, 王海燕, 等. 基于图标特征的头盔显示界面布局实验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(5): 865-870.
SHAO Jiang, XUE Cheng-qi, WANG Hai-yan, et al. Experimental Research on Helmet Display Interface Layout Based on Icon Feature[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015, 45(5): 865-870.
- [79] 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. ACT-R Cognitive Model Analysis of Visual Icon Search Behavior[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(10): 1740-1749.
- [80] 张雄飞, 薛澄岐, 沈张帆. 人机交互数字界面的图标复杂度探析[J]. 设计, 2017(19): 119-120.
ZHANG Xiong-fei, XUE Cheng-qi, SHEN Zhang-fan. Analysis on Icon Complexity of Human-Computer Interaction Digital Interface[J]. Design, 2017(19): 119-120.
- [81] 彭宁玥, 薛澄岐. 基于特征推理的图标搜索特性实验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(4): 703-709.
PENG Ning-yue, XUE Cheng-qi. Experimental Research on Icon Search Characteristics Based on Feature Reasoning[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(4): 703-709.
- [82] 袁浩, 陈典良. 智能手机界面中扁平化图标尺寸可用性[J]. 包装工程, 2018, 39(4): 182-186.
YUAN Hao, CHEN Dian-liang. Flat Icon Size Availability in Smart Phone Interface[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(4): 182-186.