

基于认知负荷理论的雷达信息视图交互设计策略研究

宫晓东^{1,2}, 龚迁^{1,2}, 刘毓舜^{1,2}, 邱越¹

(1.北京理工大学, 北京 100081, 2.雷达人机工程联合创新实验室, 北京 100081)

摘要: **目的** 以降低操作者认知负荷为目标从人机认知任务分配角度探讨雷达界面信息图的交互设计策略。**方法** 对基于雷达信息图的系统观察任务流程进行分析, 基于新型人机协同、人机合作视角探讨系统人机功能分配的原则, 采用认知负荷评测方法, 通过用户绩效测量和 NASA-TLX 量表, 采集分析任务完成的时间、正确率及认知负荷水平, 比较不同的人机分工方案对操作者认知负荷的影响。**结果** 基于新的人机功能分配策略的设计方案中, 用户完成时间、正确率均大于初始方案, 完成任务的认知负荷小于初始设计方案。**结论** 复杂信息界面的信息呈现与交互设计, 可以通过系统功能在人机之间的合理分配, 充分发挥人机各自优势, 降低操作者的认知负荷, 提高观测准确率, 提高系统绩效。

关键词: 认知负荷; 雷达信息图; 交互设计; 人机分工

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)20-0066-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.20.005

Interactive Design Strategy Research on Radar Information Views Based on Cognitive Load Theory

GONG Xiao-dong^{1,2}, GONG Qian^{1,2}, LIU Yu-shun^{1,2}, QIU Yue¹

(1.Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2.Radar Ergonomics Joint Innovation Laboratory, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: This paper explores the interactive design strategy of the infographic on radar interface to reduce users' cognitive load from the perspective of human-machine cognitive task allocation. This paper analyzed the systematic observation task flow of radar infographic, discussed different human-machine allocation methods of system tasks from the perspective of new human-machine coordination and cooperation, collected and analyzed the task completion time, accuracy rate and the cognitive loads through user performance measurement and NASA-TLX scale, and contrasted the impact of different human-machine task allocation methods on users' cognitive load. In the design based on the new human-machine task allocation, the users' completion time and accuracy rate were both greater than those in the initial interface design, and the cognitive load to complete the cognitive task was less than that in the initial interface design. Through rational allocation methods of system cognitive tasks between humans and machines, the information presentation and interactive design of complex information interfaces can give full play to the respective advantages of humans and machines, reduce the cognitive load of operators, and improve observation accuracy and system performance.

KEY WORDS: cognitive load; radar infographic; interactive design; human-machine task allocation

雷达, 被称为环境观测的“眼睛”和“耳朵”, 广泛应用于社会经济发展、科学研究和军事作战等多个领域, 如气象预报、环境监测、天体研究、大气层

结构研究、导航等, 是以计算机技术为依托、以数字化的信息系统进行运作、监管和决策的人机一体化复杂系统^[1]。雷达界面信息除了多源、信息量大、时效

收稿日期: 2021-05-09

作者简介: 宫晓东 (1969—), 女, 山东人, 博士, 北京理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为复杂信息系统交互设计。

通信作者: 邱越 (1965—), 男, 江苏人, 博士, 北京理工大学教授, 主要研究方向为工业设计、交互设计。

性强等特征外，通常专业术语较多，是典型的复杂信息界面，其界面视觉呈现和交互设计对操作者的学习成本及操作过程中的认知负荷具有重要影响。从不同角度探索雷达信息界面设计，以降低操作者认知负荷，正引起相关领域的高度关注。

1 认知负荷理论概述

1988 年，认知心理学家约翰·斯威勒（John Sweller）在米勒^[2]、阿特金森和谢弗林^[3]等人的研究成果基础上，提出了感觉记忆和短时记忆的容量都是有限的，当人直接或间接接收的信息多于记忆容量时，便会造成认知系统的负担，形成认知负荷^[4]。阿特金森和谢弗林的记忆贮存模型见图 1。随着人机交互系统逐渐向数字化、信息化、智能化转变，形成了各种复杂的信息环境，如航空航天、核电、航海雷达等领域，即所谓的复杂人机信息系统，其界面通常具有信息容量大、结构关系错综复杂的特点。

在复杂的信息系统人机界面中，认知负荷是指操作者为了顺利完成某项工作任务，实际投入到注意和工作记忆中的认知资源总量，以及占大脑总的固有的认知资源的比例。当系统要求用户完成任务的难度、提供的材料难度等与人的有限的认知资源（认知能力、认知方式等）不匹配的时候，就造成了用户的认知负荷超载。人机界面认知负荷形成的因素模型^[5]见图 2。由此带来的人类认知机理与界面信息供给之

间的不平衡问题急剧增加，即“人”的一方通常面临认知负荷过重的问题，从而可能引发人因失误，影响人机系统的高效运行和安全。当前，关于复杂人机系统中认知负荷的内在机理的研究已经在不同学科领域得到广泛关注，其中如何优化界面信息呈现方式，使其与人的认知能力相匹配，进而提高人机对话效率，也日益成为设计从业人员关注的焦点之一。

2 国内外研究现状

2.1 国内外雷达信息界面设计相关领域研究

本研究以专业检索方式构建检索式 $SU = \text{“雷达”} * (\text{“界面设计”} + \text{“交互设计”} + \text{“用户体验”} + \text{“人因工程”} + \text{“显控”})$ 在中国知网 CNKI 以及 Web of Science 核心合集集中的 Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)、Social Sciences Citation Index 等文献库进行检索。共获得有效中文文献 119 篇、外文文献 10 篇。

2.1.1 国外相关研究

检索到的国外相关文献数量较少的原因之一可能与雷达信息系统话题相对敏感有关。其中与信息界面交互设计比较相关的文献可以分为早期和近期两个阶段。早期文献主要指 2010 年以前，主要技术背景是仪表式界面向综合电子界面过渡的时期。有研究者从信息的集成显示对操作者和系统效能的影响方面进行了探讨，为电子集成界面的广泛应用提供了依据。如 Moertl（2002 年）提出知觉信息整合有利于提升信息检索性能，并提出了人机功能分配的理念^[6]。Sauer（2002 年）探究了雷达和电子海图信息以不同的方式呈现给操作人员时监视时间、场景复杂性与情景意识的关系，研究表明，集成显示使导航的主要任务性能有所提高^[7]。Olsson（2006 年）的研究表明，合理的信息集成，可以减少导航设备相关的显示器和按键面板的数量，可减少工作人员在信息搜索和操作

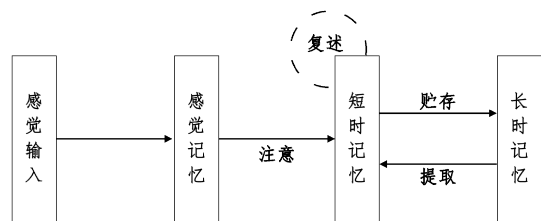


图 1 阿特金森和谢弗林的记忆贮存模型
Fig.1 The multi-store model of memory by Atkinson & Shiffrin, 1968

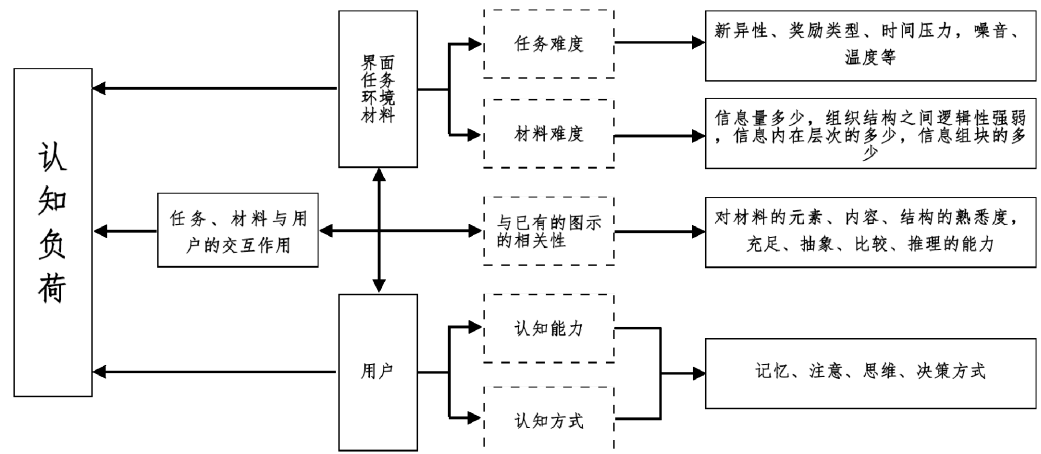


图 2 人机界面认知负荷形成的因素模型
Fig.2 Factor model of formation of human-machine interface cognitive load

控制中所投入的精力,从而提高工作人员的安全操作的能力^[8]。Burigat (2007 年)则比较了不同的导航辅助工具在桌面虚拟环境中执行寻路任务中的辅助作用^[9]。近期文献主要指 2010 年之后,特别是近五年来,日益集成、复杂的信息系统对人的认知机制提出了挑战,出现了关于降低认知负荷的研究文献,如 Berenger M (2016 年)提出好的视觉设计可以改善大脑处理能力,释放操作员的注意资源,使其更有效地处理其他额外的关键刺激^[10]。Tseng (2018 年)则基于视觉搜索任务,讨论了图标设计及地图背景杂波等的影响,提出在带有大图标和未显示地形(TND)的地图背景的界面中,可以获得最佳的监控效果,可降低雷达监视操作人员的工作负荷^[10]。

2.1.2 国内相关研究

通过分析发现,国内的与雷达设计相关的文献主要从 5 个方面开展研究:(1)基于算法的模块化设计理念;(2)基于算法的雷达系统性能提升研究;(3)用户体验即交互设计思想在雷达交互设计中的应用;(4)基于 Qt 等编程语言的界面图形化设计;(5)基于人因工程的雷达硬件设计研究。其中关于人机信息界面方面的研究主要体现为以下两个方面:

用户体验、交互设计思想在雷达交互设计中的应用。袁国安等人(1997 年)从提高人的操作可靠性出发,提出了防空雷达人机界面设计的若干规则,并尝试构建有关指标来衡量人机界面的设计优劣,利用人工神经网络分析方法,综合评估雷达的人机界面设计质量,指导雷达的人机界面设计^[12]。张莉(2013 年)则将用户体验设计基本原则运用于雷达控制台界面,提出与分析了雷达用户体验设计的概念、流程以及方法,扩展了用户体验设计应用的领域^[13]。陈雨薇(2018 年)基于用户体验设计原则、一致性原则以及美学完整性原则 3 个方面对国内军用雷达软件的用户界面设计进行讨论分析^[14]。吴潇伟(2019 年)从人的视觉机制出发,总结归纳了船舶导航雷达显控界面的设计原则,并通过 TOPSIS 评价方法对优化前后的显控界面进行了视觉体验度量评价,验证了相关设计方法的有效性^[15]。叶显武(2020 年)基于舰载相控阵雷达作战效能高,多任务、多功能、多目标,人机交互复杂难度大的特点,提出了雷达人机交互应遵循人机协同工作、以人为中心进行交互设计的基本原则^[16]。

基于 Qt 等编程语言的界面图形化设计。这一领域的研究主要集中在界面图形化设计工具的开发方面,郝春环(2005 年)^[17]、崔红亮(2007 年)^[18]、武伟(2014 年)^[19]等人提出应采用图形化用户界面设计雷达显控终端软件,并从实现方法和技术层面进行了研究。李红兵(2019 年)^[20]、练学辉(2014 年)^[21]、胡杨(2016 年)^[22]等人基于 Qt 作为工具实现了雷达显控终端图形化的显示及人机交互功能,在

图形界面生成、设计界面友好方面进行了探索。

2.1.3 小结

国内的研究除了界面开发工具的探索之外,较多关注通用界面设计或体验设计原则在雷达领域的应用设计拓展,以及界面设计的评价;从国外的相关研究中可以看到对界面设计与人的认知资源、操作绩效等相互关系的探讨。总体来说,国内外可检索到的与雷达界面设计相关的研究虽然较少,但是在关于雷达界面的复杂性及其对操作者有限的认知资源构成了挑战等方面达成了共识,相关领域的研究者从不同角度出发对优化系统设计以缓解这一矛盾进行了探讨。

2.2 新型人机关系的出现

计算机技术的不断发展推动了智能时代的到来,对人机关系产生了深刻的影响,为构建系统中的新型人机关系提供了可能性。“人机组队”(Human-Machine Teaming, HMT)、人机协同正在成为智能时代人机关系发展的新趋势^[23],表征为在人与智能体(机)之间是基于一种团队队友之间的合作来实现两者之间的“交互”,‘机’可以基于大数据、AI、深度学习等技术,承担系统中更多的运算、记忆、推理等辅助决策任务,而‘人’可以更多地司职判断、决策与方案调整,使人机能够各自发挥优势。机器智能(模式识别、推理等能力)与人的生物智能(人的信息加工等能力)之间可以形成互补^[26],提高了系统的运转效率,减少了因为人的认知局限造成的出错几率。

新的智能人机协同发展趋势拓展了降低复杂信息系统中操作人员认知负荷过重的解决路径,即不仅可以从界面信息的可视化层面探讨优化的可能性,还可以从系统认知任务人机之间重新分配的角度去做更深入的探讨,进而重新思考和驱动系统界面的信息供给与设计。例如,许为等人^[27]在有关一项智能供应链解决方案的项目中,针对系统开展了一系列人机作业和任务分析,通过优化人机功能分配,使智能系统承担了更多的功能,减少了大量的人工作业,从而在提升系统生产效率、用户体验等方面都取得了显著的改进。但总体来说,技术的日新月异在交互设计层面的影响研究仍然存在一定的滞后,已有的相关探索多从计算机和工程心理学等角度出发,特别是在复杂信息系统如雷达的交互设计中,其领域的特殊性,使其基于新型人机关系的交互设计研究仍然处在一个有待进一步在实践的基础上不断积累、提炼和探索的阶段。本研究即从新型人机关系发展趋势出发,以雷达界面信息图的交互设计为例,探讨降低认知负荷的设计原则与方法。

3 雷达典型信息图简介

信息图是雷达观测系统人机交互界面的重要组成要素,是用户准确捕捉目标信息、及时了解态势变

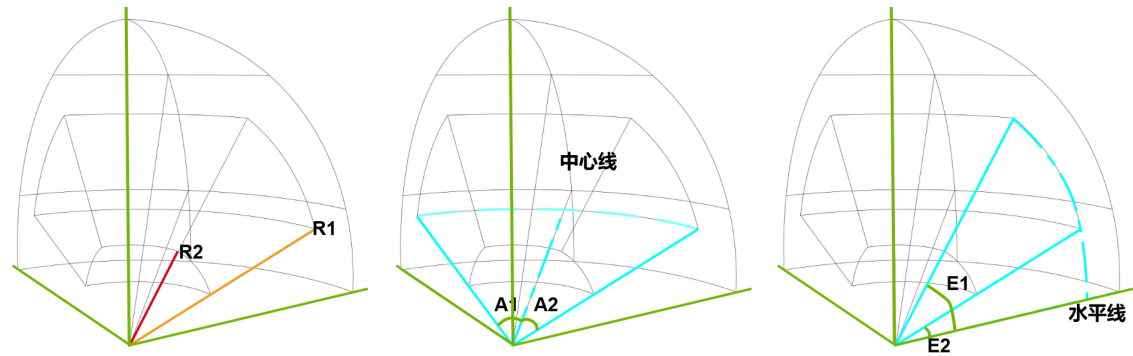


图 3 雷达方位参数示意图
Fig.3 Schematic diagram of radar azimuth parameters

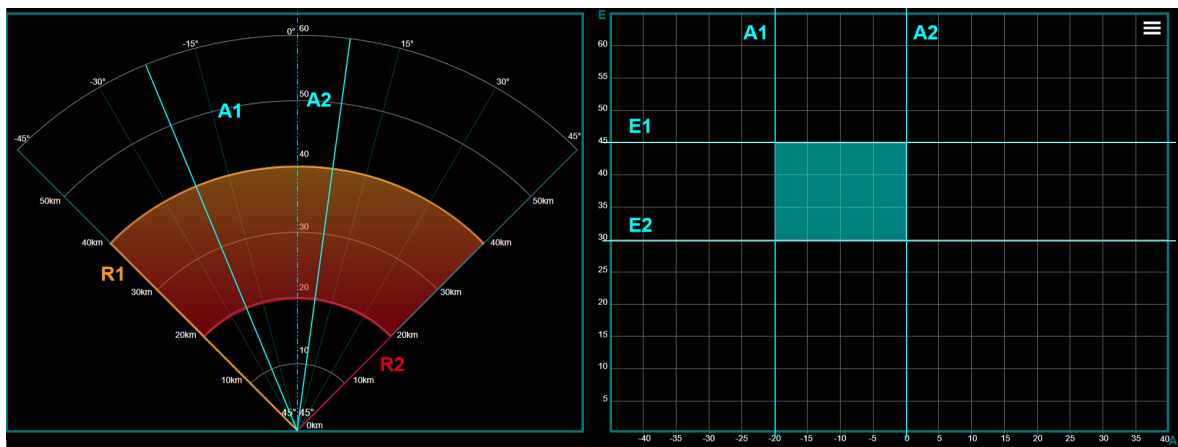


图 4 偏心 p 显和 AE 视图
Fig.4 PPI-Scope and C-Scope

化的重要窗口。本研究以雷达典型信息图偏心 P 显与 AE 视图为例，基于任务流程，探讨了人机间认知任务分配对用户认知负荷的影响。雷达方位参数示意图见图 3。

如图所示，在雷达探测目标过程中，关于探测参数设置的方位信息主要分为 3 类：探测距离、水平角和俯仰角。这 3 类信息在偏心 P 显及 AE 视图中得到了有效体现。其中 R1 和 R2 分别代表了雷达探测的舍近距离和舍远距离；A1 和 A2 分别代表了雷达扫描最大范围中心线与当下扫描范围边线的夹角，其中位于中心线左侧的夹角为负值，右侧为正值。E1 和 E2 分别代表了搜索俯仰角度的上限和下限。

偏心 p 显和 AE 视图见图 4。雷达 PPI-Scope (Radar PPI-Scope): PPI 示波器是目前最常用的雷达显示器，它是雷达平台周围区域的极坐标显示，通常以雷达自身位置为扫描的原点，采用径向扫描的方式探测雷达平台周围区域。屏幕上的扫描旋转速度与雷达天线速度一致，以确保获得与雷达波覆盖区域地图一样的图像。通过偏心显示法，放大显示某个区域的雷达图像，可有效提高显示精度和分辨力，所得图像即为图 4 左侧视图所示的偏心 P 显。偏心 P 显可显示水平方位角信息和距离信息。

A-E 视图 (Azimuth/Elevation (C) Scopes): C-scope 视图横纵坐标分别为相对水平角和相对俯仰角，本质上给出目标的方向，而非目标实际距离。通常的雷达观测，是以雷达偏心 PPI-Scope 和 C-Scope 的参数组合，来构建搜索区域及目标的三维空间坐标，两者是雷达搜索目标过程中常用的二维空间显示器。因此，本文即以雷达界面中的偏心 PPI-Scope 和 C-Scope 信息图设计为例，展开相关研究。

4 基于目标捕捉的雷达信息图任务流程及痛点分析

任务简述：操作员接到目标跟踪任务，根据收到的目标基本方位信息，对雷达偏心 PPI-Scope 和 C-Scope 视图进行搜索区域的参数设置，以跟踪目标。

任务分解：任务可分为 3 个阶段，分别是设置搜索参数前的操作准备、搜索区域设置与下发、目标监测，并将 3 个阶段细分为 8 个子任务，通过对操作员观测操作的行为路径分析，分析雷达偏心 PPI-Scope 和 C-Scope 视图使用过程的交互逻辑、信息基础与要求及痛点，偏心 PPI-Scope 和 C-Scope 视图的典型任务分析见表 1。

表 1 偏心 PPI-Scope 和 C-Scope 视图的典型任务分析
Tab.1 Typical task analysis with off-centered PPI-Scope and C-Scope

阶段	设置搜索区域前操作			搜索区域设置与下发			目标监测
目标	激活视图	打开参数设置面板	设置参数	预览搜索区域	关闭参数设置面板	视图观测	视图观测
行为	打开区域搜索设置	调取参数设置面板	选择区域 1 并设置参数	预览区域 1	关闭参数设置面板	观察视图	观察视图
操作	点击 ‘区域搜索设置’ 控件	点击 “参数设置” 控件	依次点击 R1、R2、A1、A2、E1、E2 参数输入框输入相应数值	点击 ‘预览’ 控件	点击 ‘关闭’ 或 ‘参数设置’ 控件	观察目标是是否进入预设区域	观察目标是是否脱离搜索区域,若脱离则重复搜索区域设置与下发相关操作
触发控件	区域搜索设置	参数设置	R1、R2、A1、A2、E1、E2 参数输入框	预览	关闭或参数设置	观察目标是是否进入预设区域	参数设置 下发 关闭/参数设置
预期结果	显示参数设置面板	视图中显示预设区域 1, 边线为虚线	R1、R2、A1、A2、E1、E2 录入正确	参数数值设定无误	参数设置面板隐藏	视图中预设区域 1 边线由虚变实	
信息基础	激活视图	R\A\E 的参数类型与数值范围 R1、R2 大小关系 A1、A2 大小关系 E1、E2 大小关系					
信息要求		R\A\E 的参数类型与数值范围 R1、R2 大小关系 A1、A2 大小关系 E1、E2 大小关系					
操作痛点		需记忆参数类型、范围等,增加记忆负担与操作出错机率 参数设置需通过面板逐一设置,便捷性差	需保持观测状态,需调取参数设置面板,操作步骤多	需设置参数后手动关闭面板,注意力要求较高	目标如脱离搜索区域,需按程序逐一重新设置搜索区域参数,时间压力下操作人员易忙中出错		

操作人员在操作过程中的主要痛点分析如下：

（1）操作员搜索区域设置。目标方位参数设置过程中的信息基础是 R、A、E 三类参数的属性，包括参数类型、数值范围与同类参数的数值关系，操作员在对系统未知目标进行搜索区域设置时，需要了解和记忆这些基本属性要求，可能因信息量大或时间压力等因素而出现输入绩效低或输入错误，影响工作效率。

（2）手动关闭参数面板。操作员设置完参数、预览下发后，需手动点击关闭参数面板。（3）预览方案下发。操作员需手动调取参数设置面板，选择预览方案、点击下发控件，操作步骤较多。（4）设置方式单一。区域参数设置的形式仅提供通过参数面板进行数值输入的方式，灵活性不够，影响操作效率。（5）观测过程对注意力的持续性投入要求较高。操作员需全程实时关注目标信息以了解目标状态，及时跟踪目标，如是否进入或溢出观测范围，一旦溢出需立刻重新设置新的观测区域等。（6）溢出目标区域设置。一旦发生目标溢出，操作员需根据屏幕观测信息按部就班逐一重新进行观测区域的参数设置，对于时效性强的任务，操作人员记忆和操作压力较大，容易忙中出错。

5 人机功能重新分配策略及设计优化

人机功能分配的根本问题是基于人机的特性分析，决定把什么任务分配给人，把什么任务分配给机器，从而充分发挥人机各自优势，使人机效能最大化。通过对现有文献中人机认知特点进行梳理对比^[28]，整理人机能力对比见表 2。

在本研究中，针对前述交互流程分析中的痛点，以降低人的认知负荷为宗旨，确定雷达信息图交互设计中人机功能分配的基本原则是：充分考虑人机各自的特点，将机器（系统）能够完成的任务优先分配给机器，以减轻人的工作负担和认知资源消耗。具体策略为：

1）将需要记忆的信息更多地交给机器，减少人的记忆负担和出错可能性。如在本任务中，当需要操作者设置参数时，为了减少操作者必须记忆参数各种属性的认知负荷，设定由机器默认提供相关信息提

示，降低出错几率，参数面板中的参数设置提示见图 5。在右上角参数输入栏中给出参数形式与范围提示。

2）将需要持续高度注意资源的任务尽可能交给机器，减轻人的认知疲劳。如在本任务中，初始系统任务设置是由操作者持续关注目标方位的变化，当目标进入或溢出观测区域时，需要进行相应的操作。调整后的任务分工将观测任务交给机器，当目标即将进入或溢出观测区域时，通过视觉、听觉等进行多通道提示，吸引观测者注意，减轻对操作者持续注意力的需求。目标进入搜索区域的提示见图 6。

3）将时效性较强的认知任务分配给机器，由人进行决策，减轻由于时间压力带给操作者的认知紧张和出错可能性，提高效率。例如在本任务中，当目标溢出观测区域，需要尽快设置新的观测区域以锁定目标时，选择由系统根据目标速度、方向等参数信息直接给出区域设置方案，由操作者直接确认或做出微调，目标溢出搜索区域的提示见图 7。

4）减少操作环节，也是减轻人员工作负荷、提高系统效率需要考虑的重要部分。在本任务中，针对痛点 2 参数设定完成之后，乘员既可手动关闭面板，也可要求系统当 3 s 内无其他操作，参数设置面板自动关闭。参数面板 3 s 内无操作自动隐藏示意图见图 8。针对痛点 3，当有预设搜索区域时，C-Scope 视图中“参数设置”图标控件旁显示“下发”图标控件，可在参数设置面板关闭状态下一键下发预设区域，下发按钮示意图见图 9。针对痛点 4，增加鼠标滑窗设置搜索区域，搜索区域设置示意图见图 10。当界面出现目标时，系统根据目标轨迹推算，自动提供 R 值的最佳参数设置推荐方案，操作员可根据情况决定接受或调整。

5）人是系统的最终决策者，因此在本任务中，系统可以提供方案，但最终确认和修改的任务交给操作者（如图 7）。当目标溢出区域时，系统提供新的搜索区域设置方案，操作员决定调整参数或接受方案。

优化后的任务流程：通过人机功能的重新分配驱动界面交互设计优化。新的流程优化示意图见图 11。

（1）激活视图参数设置功能。（2）点击参数设置面板，设置搜索区域参数，参数输入框中提示参数的基

表 2 人机能力对比
Tab.2 Capability contrast between humans and machines

人擅长于：	机器擅长于：
a. 人的听觉、嗅觉等某些感知能力强于机器	a. 机器能按需控制功率、强度和负荷的大小
b. 人具有多通道接收信息的能力	b. 机器运作快，信息加工处理速度快
c. 人灵活性和可塑性强	c. 机器工作误差能随机器的精度升高而降低
d. 人具有长久的信息存贮能力及随时综合利用记忆信息进行分析 and 判断。	d. 机器稳定性好，可保持效率持续性工作
e. 人具有自我反思、总结、不断提升的能力	e. 机器感知能力一般强于人
f. 人能进行归纳推理。	f. 机器能较为高效、精准地进行多线程工作
g. 人具有情感与意识，具有能动性，能传承文化	g. 机器能执行恶劣环境下的工作

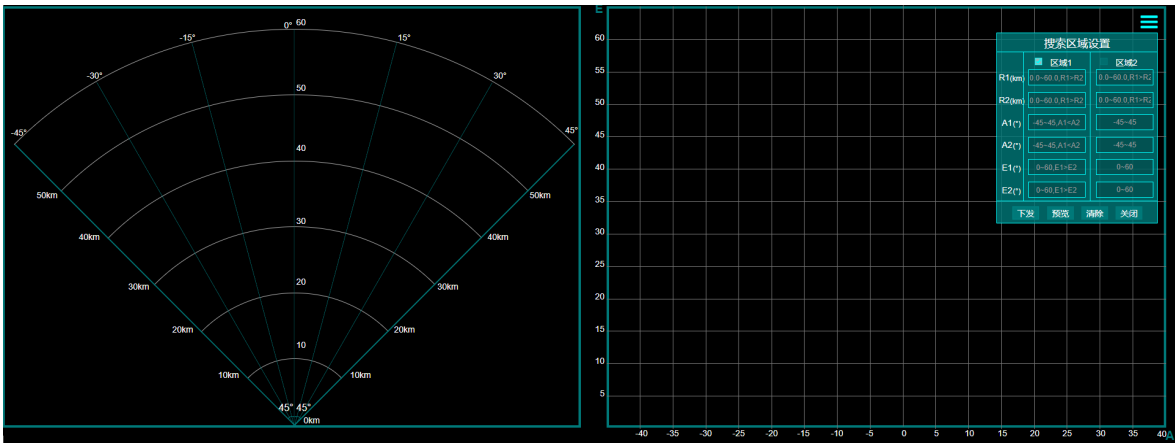


图 5 参数面板中的参数设置提示
Fig.5 Parameter setting tip in the parameter panel

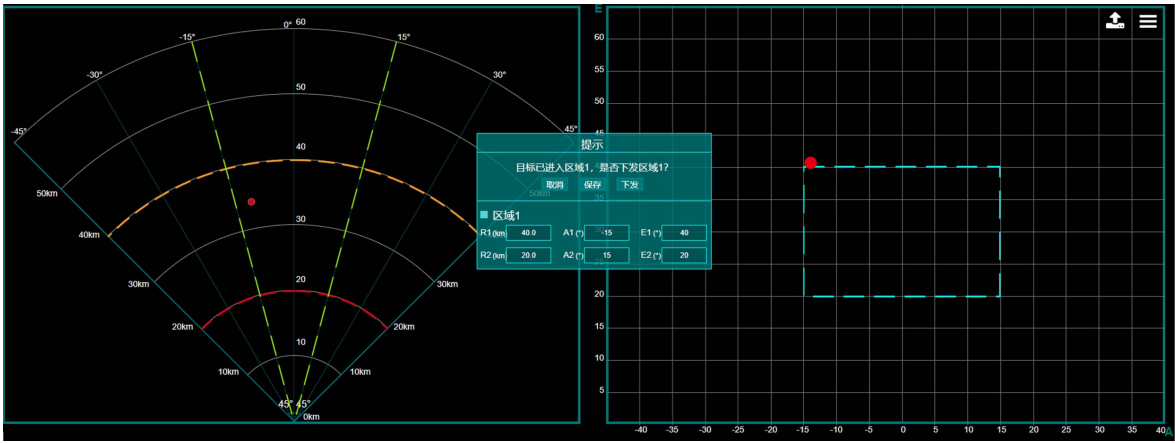


图 6 目标进入搜索区域时的提示
Fig.6 Report on the target having entered the search area

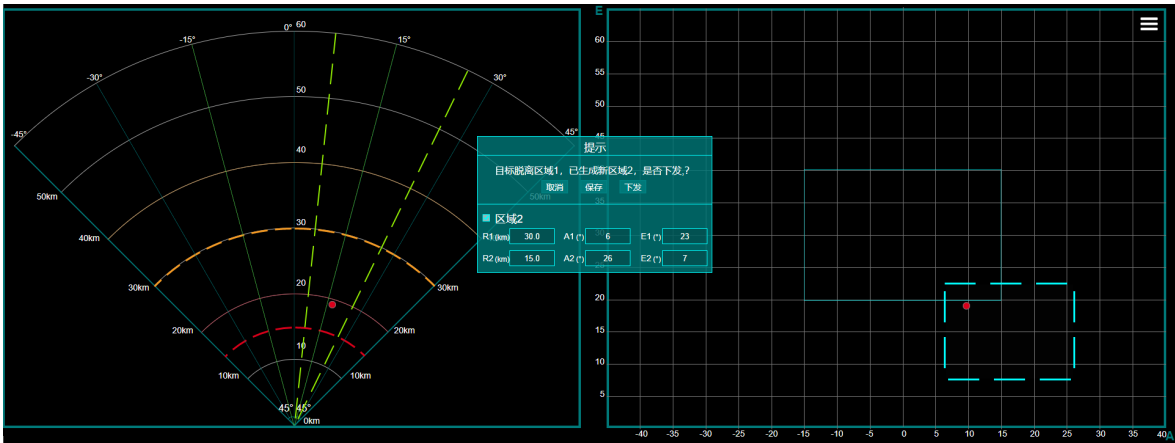


图 7 目标溢出搜索区域时的提示
Fig.7 Report on the target having left the search area

本属性。(3)参数设置完成,点击预览查看预设区域,此时区域边线显示为虚线表示为未下发。操作员可点击关闭控件关闭面板;而若预览 3 s 内无后续操作,参数面板自动关闭。(4)当目标进入预设搜索区域时,系统提示目标进入搜索区域,操作员可决策是否下

发,点击面板中下发控件即可下发搜索区域,下发后搜索区域边线由虚转实。(5)观测视图,当目标溢出搜索区域时,系统提示目标溢出搜索区域,并生成新的搜索方案,操作员依据情况进行决策;若需下发新的搜索区域方案,可直接点击提示面板中的下发控

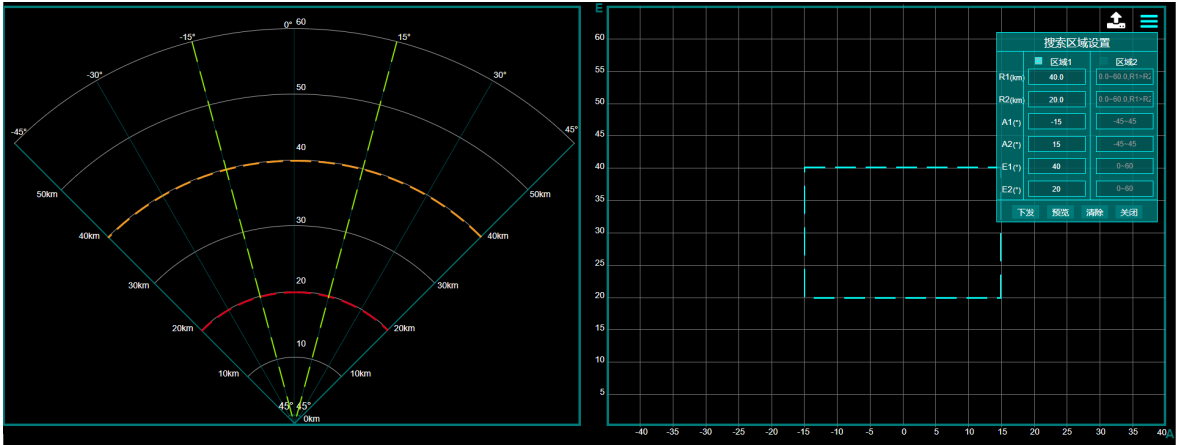


图 8 参数面板 3 s 内无操作自动隐藏示意图
Fig.8 Schematic diagram of automatic hiding of parameter panel without operation within 3s

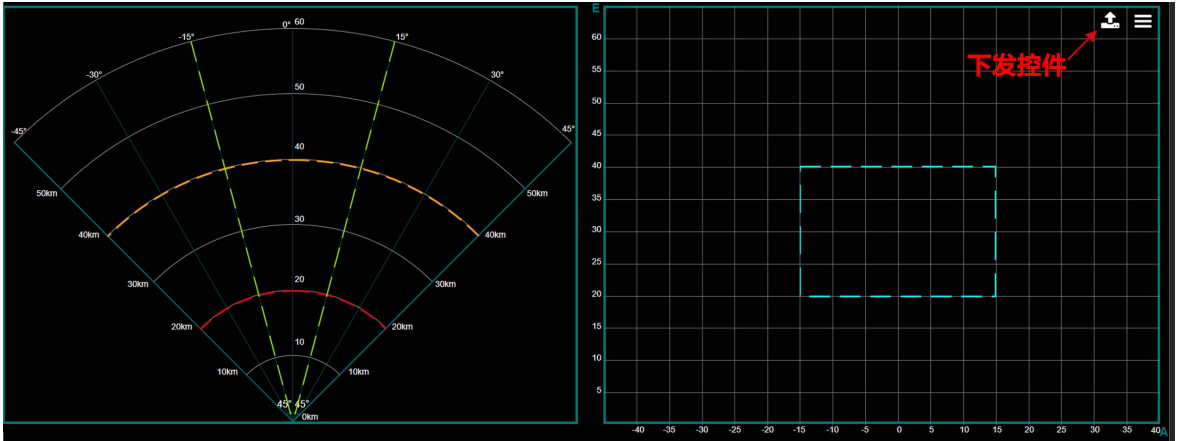


图 9 下发按钮示意图
Fig.9 Schematic diagram of issuing button

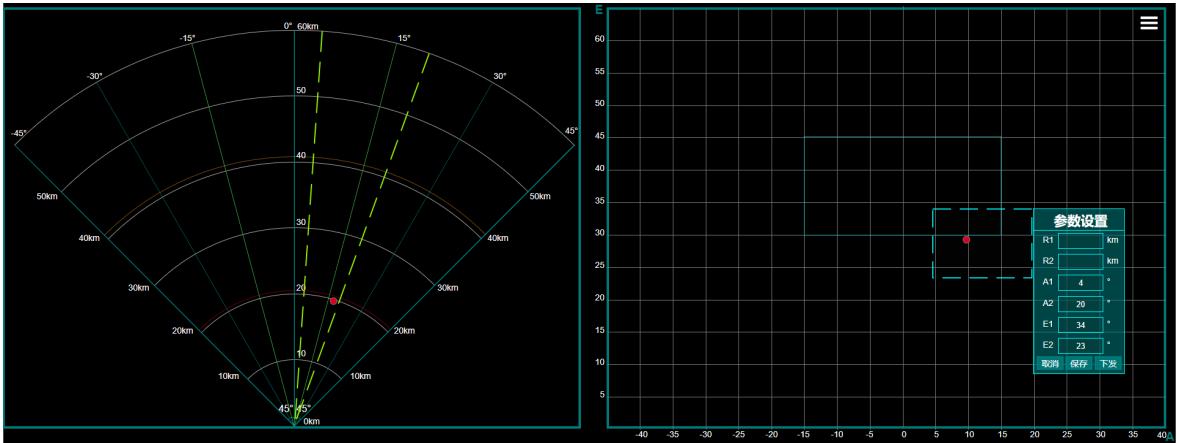


图 10 搜索区域设置示意图
Fig.10 Search area setting diagram

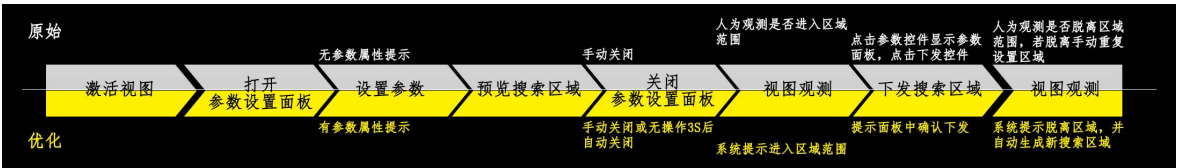


图 11 流程优化示意图
Fig.11 Process optimization diagram

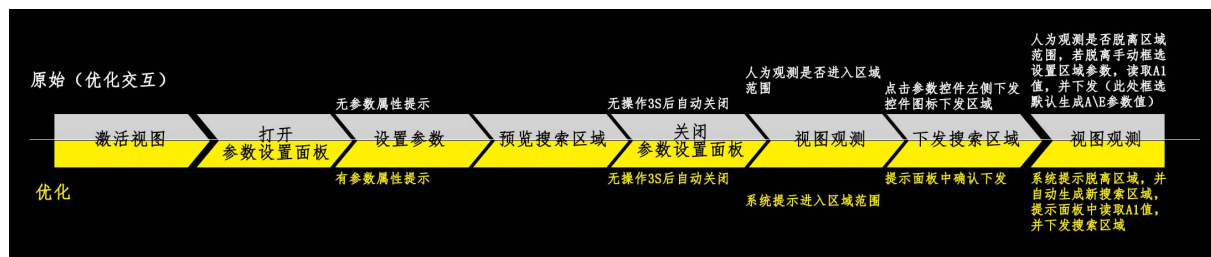


图12 A、B方案测试任务流程示意图

Fig.12 Schematic diagram of test task process of plan A and B

件，下发新区域。

6 实验设计与设计评估

目前，关于认知负荷的评估可以通过主观评定、实验范式任务分析（包括主任务分析、次任务评定）和生理测量等技术进行^[30]。本研究主要采用主观评定方法，运用任务与绩效测量和NASA-TLX量表测试，记录受试者按照任务流程操作两类界面不同任务节点完成时间与准确率和主观评价的认知负荷，进而验证分析新的人际功能分配方案的合理性。

实验设计方案及测试数据分析如下：

6.1 实验设计

6.1.1 被试

20名本科级以上学历学生，专业背景相似，此前未接触实验材料。受试者无色盲、无色弱、矫正视力不低于5.0，按测试要求分为两组，每组10人。

6.1.2 测试材料

优化交互的原始界面流程说明及测试Axure高保真原型、优化界面交互和认知任务分配的新界面流程说明及测试Axure高保真原型（两者界面风格一致）、NASA-TLX量表、任务成功记录表（子任务操作正确计“1”，操作失误计“0”）。

6.1.3 实验仪器

实验设备主要包括远程指导笔记本（显示像素：1920 px×1080 px，15.6英寸）、测试笔记本（显示像素：1920 px×1080 px，15.6英寸）、数据采集软件（腾讯会议、Axure文件）。

6.1.4 测试环境

该次实验的方式是让受试者以坐姿的姿态操作界面，受试者距显示器50 cm。测试应疫情影响采用线上测试方式进行，室内照明条件正常，照度为300 lx。

6.1.5 实验设计方案

实验分为两组，基于新型人机功能分配理念设计的交互设计方案记为A，实验组原界面记为实验组B。实验设计主要包括3个部分。第1部分，实验前根据测试说明材料让受试者了解测试操作流程及基本知

识。第2部分，分别使用设计方案A和B进行测试，主体测试流程如下：（1）视图激活。（2）区域参数设置。点击参数设置控件，调取参数设置面板，设置搜索区域所需设置的6个参数，并点击预览控件预览搜索范围。（3）观察视图初次下发搜索区域。观察视图，观察目标是否进入搜索区域，当目标进入搜索区域时，选择方案对应的方式，下发搜索区域。（4）观察视图，当目标溢出当前搜索区域时，选择方案对应的方式生成新搜索区域，读取A1数值，并下发新搜索区域。告知被试，测试任务结束。A、B方案测试任务流程示意图见图12。第3部分，填写NASA-TLX量表。客观评价自己在操作过程中的感受。

6.2 实验数据及结果

在每个受试者完成任务之后，客观地评价操作过程。之后设定6项负荷指标的权重：通过两两比较的方式，每个维度比赢一次得1分，计算出6个维度的权重^[31]。

$$W_i = \frac{N_i}{N} \quad i (i=1 \sim 6) \quad (1)$$

$$N = \sum_{i=1}^6 N_i \quad (2)$$

每项指标的权重为 $N/15$ ，最终计算出的认知负荷值为6个维度的加权平均值。认知负荷值为：

$$W = \sum_{i=1}^6 W_i R_i \quad (3)$$

R_i ：各项维度的评分； W_i ：各项维度的权重； N_i ：选择第 i 项维度为重要维度的数目。

经过计算得到实验组A、B组测试数据见表3。

任务平均正确率：被试完成每个子任务的任务成功率的平均值，子任务包括区域1的R1和R2值设置、A1和A2值设置、E1和E2值设置、区域1是否设置在视图集中区域、区域1下发、区域2下发等。

由表2可知，完成时间比较：实验组A采用的是系统功能重新分配的设计方案A，4个任务T1、T2、T3、T4的完成时间分别为：30.05 s、3.90 s、5.36 s、100.50 s，而组B采用的是初始设计方案B，4个任务完成时间分别为：58.06 s、3.89 s、33.61 s、164.20 s，组A的完成时间显著快于组B。完成任务时间作为测

表 3 实验组 A、B 组测试数据
Tab.3 Test data of experimental group A and B

实验组	T ₁ (s)	T ₂ (s)	T ₃ (s)	T ₄ (s)	任务平均正确率	认知负荷
实验组 A	30.05	3.90	5.36	100.50	95%	25
实验组 B	58.06	3.89	33.61	164.20	73%	39

参数说明：

T₁：打开参数设置面板进行参数设置到点击预览控件的时间；

T₂：观察到目标进入预设区域并下发的时间；

T₃：目标离开区域预设区域 1，生成区域 2 并下发的时间；（B 组中区域 2 采用键鼠滑窗的形式进行区域设置，默认生成 A、E 值，但须手动输入 R 值）

T₄：视图激活到任务区域 2 下发的时间。

量认知负荷的常用方法之一^[32]，可见优化后的设计方案有效地降低了受试者的认知负荷。

正确率比较：通过 A、B 组子任务正确率分析，采用方案 A 的实验组 A 完成任务的平均正确率 95%，远高于采用方案 B 的实验组 B 的 73%，正确率方面设计方案 A 优于设计方案 B。

认知负荷水平比较：通过 NASA-TLX 量表测试，A 组的平均认知负荷显著小于 B 组的认知负荷。

综上所述，优化后的设计方案 A 有效地降低了受试者的认知负荷。

7 结语

基于智能系统新型人机关系，探讨从人机功能分配的角度，重新思考复杂人机信息系统中降低人的认知负荷的设计路径，拓展了人机界面交互设计方法的思考维度。本研究针对雷达典型信息图的交互设计，在充分理解人的认知能力特点和机器能力特点的基础上，根据任务需求，对系统任务进行重新分工：将需要记忆、需要高度持续注意力需求的任务交给机器，而将最终决策与调整的任务交给给人，减少人的工作负担，进而降低人的认知负荷。并基于新的人机任务分配策略驱动交互方案的优化设计，通过不同方案下人的认知负荷水平的比较，验证了策略的有效性，为雷达信息图的交互设计提供了参考。面向雷达一类的复杂信息系统，从系统功能再分配的角度出发，以提高系统整体绩效和运行的安全性为前提，探讨降低操作者认知负荷的设计策略或方法，相关设计研究还存在很大的探索空间，还需要更加综合的多角度的深入思考，例如更加清晰的功能分配原则、更具普适性的认知资源的量化方法，以及不同分配方法与设计方法的映射等，后续仍需要基于实践的积累进一步深入探究。

参考文献：

[1] 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 Digitalized Human-Computer Interface on Complex Information System[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2015.

[2] Miller G. Human memory and the storage of info[J]. Ire Transactions on Info. Theory, 1956, 2(3): 129-137.

[3] Atkinson R C, Shiffrin R M. Human Memory: a Proposed System and its Control Processes[J]. Psychology of Learning & Motivation, 1968(2): 89-195.

[4] John Sweller. Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning[J]. No Longer Published by Elsevier, 1988, 12(2): 10.

[5] 李晶. 均衡认知负荷的人机界面信息编码和研究[M]. 南京：东南大学出版社，2018.

LI Jing. Human-machine Interface Information Coding and Research on Balanced Cognitive Load[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2018.

[6] Moertl P M, Canning J M, Gronlund S D. Aiding Planning in Air Traffic Control: an Experimental Investigation of the Effects of Perceptual Information Integration[J]. Human Factors, 2002(44): 10.

[7] Sauer J , Wastell D G , Hockey G R J , et al. Effects of Display Design on Performance in a Simulated Ship Navigation Environment[J]. Ergonomics, 2002(1): 10.

[8] Olsson E, Jansson A. Work on the Bridge-studies of Officers on High-speed Ferries[J]. Behaviour & Information Technology, 2006, 25(1): 37-64.

[9] Burigat S , Chittaro L . Navigation in 3D Virtual Environments: Effects of User Experience and Location-pointing Navigation Aids[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2007, 65(11): 945-958.

[10] Berenger M, Tremblay S, Giraudet L, et al. The Neuro-ergonomic Evaluation of Human Machine Interface Design in Air Traffic Control Using Behavioral and Eeg/erp Measures[J]. Behavioural Brain Research An International Journal, 2015(294): 246.

[11] Tseng, Feng Yi Chao, et al. Design and Evaluation of Military Geographical Intelligence System: an Ergonomics Case Study[J]. Displays, 2018(1): 10.

[12] 袁国安，郝强，王小念，等. 防空雷达人—机界面设计规则及评估方法的研究[C]. 中国系统工程学会：第三届全国人—机—环境系统工程学术会议论文集，1997.

YUAN Guo-an, HAO Qiang, WANG Xiao-nian, et al. Research on Design Rules and Evaluation Methods of Man-Machine Interface of Air Defense Radar[C]. China Society of Systems Engineering: Proceedings of the Third National Academic Conference on Man-Machine Environmental System Engineering, 1997.

[13] 张莉. 基于用户体验的雷达控制台界面设计研究[D]. 成都：西南交通大学，2013.

ZHANG Li. Research on Radar Console Interface Design Based on User Experience[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

- [14] 陈雨薇, 张庆龙. 人机交互设计在军用雷达软件的应用分析[J]. 电脑知识与技术, 2018(2): 192-193.
CHEN Yu-wei, ZHANG Qing-long. Application Analysis of Human-Computer Interaction Design in Military Radar Software[J]. Computer Knowledge and Technology, 2018(2): 192-193.
- [15] 吴潇伟. 基于视觉注意机制的船舶导航雷达显控界面设计与评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
WU Xiao-wei. Design and Evaluation of Display and Control Interface of Ship Navigation Radar Based on Visual Attention Mechanism[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [16] 叶显武. 舰载相控阵雷达人机交互设计改进探索[J]. 现代雷达, 2020(11): 6-9.
YE Xian-wu. Exploration on Improvement of Human-Computer Interaction Design of Shipborne Phased Array Radar[J]. Modern Radar, 2020(11): 6-9.
- [17] 郝春环, 高梅国. 一种基于 Windows 系统的雷达显控终端软件设计[J]. 军民两用技术与产品, 2005(12): 33-35.
HAO Chun-huan, GAO Mei-guo. Software Design of Radar Display and Control Terminal Based on Windows System[J]. Dual Use Technology and Products, 2005(12): 33-35.
- [18] 崔红亮. 一种基于通用计算机的雷达显控终端软件设计[J]. 电脑知识与技术(学术交流), 2007(10): 1080-1081.
CUI Hong-liang. Software Design of Radar Display and Control Terminal Based on General Computer[J]. Computer Knowledge and Technology (Academic Exchange), 2007(10): 1080-1081.
- [19] 武伟. Windows 下基于 Direct3D 的雷达显控系统软件设计与实现[J]. 科技信息, 2014(1): 88-89.
WU Wei. Software Design and Implementation of Radar Display and Control System Based on Direct3D under Windows[J]. Science and Technology Information, 2014(1): 88-89.
- [20] 李红兵. 二次雷达显控终端的设计与实现[J]. 舰船电子对抗, 2019(1): 112-116.
LI Hong-bing. Design and Implementation of Secondary Radar Display and Control Terminal[J]. Ship ECM, 2019(1): 112-116.
- [21] 练学辉. 一种基于 Qt 的被动雷达显控软件设计[J]. 雷达与对抗, 2014(3): 61-64.
LIAN Xue-hui. Design of a QT Based Passive Radar Display and Control Software[J]. Radar and Countermeasure, 2014(3): 61-64.
- [22] 胡杨, 刘馨丹. 基于 Qt 的雷达信号模拟器软件界面设计与实现[J]. 电子科技, 2016(4): 165-168.
HU Yang, LIU Xin-dan. Design and Implementation of Software Interface of Radar Signal Simulator Based on QT[J]. Electronic Science and Technology, 2016(4): 165-168.
- [23] 覃京燕. 人工智能对交互设计的影响研究[J]. 包装工程, 2017, 38(20): 27-31.
QIN Jing-yan. Research on the Influence of Artificial Intelligence on Interaction Design[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(20): 27-31.
- [24] 许为, 葛列众. 智能时代的工程心理学[J]. 心理科学进展, 2020(9): 10.
XU Wei, GE Lie-zhong. Engineering Psychology in the Age of Intelligence[J]. Progress of Psychological Science, 2020(9): 10.
- [25] 孙效华, 张义文, 秦觉晓, 等. 人机智能协同研究综述[J]. 包装工程, 2020, 41(18): 1-11.
SUN Xiao-hua, ZHANG Yi-wen, QIN Jue-xiao, et al. Review of Human-Computer Intelligence Collaboration[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(18): 1-11.
- [26] Umer, Farooq, Jonathan, et al. Human-Computer Interaction[J]. Interactions, 2016.
- [27] Xu W, Furie D, Mahabhaleshwar M, et al. Applications of an Interaction, Process, Integration, and Intelligence (IPII) Design Approach for Ergonomics Solutions[J]. Ergonomics, 2019, 62(7): 954-980.
- [28] Sherry L Baranek. 实现最佳人机匹配[J]. 现代制造, 2014(11): 38-38.
Sherry L Baranek. Optimal Man-machine Matching[J]. Modern Manufacturing, 2014(11): 38-38.
- [29] 威肯斯, 霍兰. 工程心理学与人的作业[D]. 上海: 华东师范大学出版社, 2003.
Christopher D Wichens, Justin Hollands. Engineering Psychology and Human Assignment[D]. Shanghai: East China Normal University Press, 2003.
- [30] 杨珏, 邓赐平. NASA-TLX 量表作为电脑作业主观疲劳感评估工具的信度、效度研究[J]. 心理研究, 2010, 3(3): 36-41.
YANG Yang, DENG Ci-ping. Study on the Reliability and Validity of NASA-TLX as a Tool for Assessing Subjective Fatigue in Computer Homework[J]. Psychological Research, 2010, 3(3): 36-41.
- [31] 张建波. 认知负荷理论: 教学设计研究的新视角[J]. 上海教育科研, 2006(11): 51-53.
ZHANG Jian-bo. Cognitive Load Theory: a New Perspective of Instructional Design Research[J]. Shanghai Education and Scientific Research, 2006(11): 51-53.
- [32] Bergstrom J R, Schall A. Eye Tracking in User Experience Design[J]. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2014(1): 10.