

防空指挥控制系统人机交互设计趋势研究

罗建平¹, 刘岗², 陈超³, 赵轶男³

(1.湖南大学, 长沙 410082; 2.清华大学, 北京 100084;

3.中国电子科技集团第二十八研究所, 南京 210014)

摘要: **目的** 梳理防空指挥控制系统人机交互设计的起源与发展趋势, 探索未来系统开发的方法与框架。**方法** 基于“以指战员为中心”的设计理念, 研究了防空作战指挥控制系统人机交互界面的设计任务层次划分, 将人机交互界面分为用户行为、交互架构与视觉表现等层次。**结论** 通过对用户的任务调研、交互架构逻辑研究及视觉设计等步骤, 对防空系统人机交互设计界面设计过程进行了梳理。提出了防空指挥控制系统在“感知—决策—操作”过程中的人机交互设计对应内容, 总结了系统界面设计与信息可视化设计的任务。通过人机交互设计研究, 建立了防空系统人机交互设计框架与目标, 提升了系统的可用性与美观度, 提高了作战任务操作的效率。

关键词: 防空; 指挥信息系统; 人机交互; 界面; 设计流程

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)24-0040-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.24.006

Human-Computer Interaction Design Process of Air Defense Command and Control System

LUO Jian-ping¹, LIU Gang², CHEN Chao³, ZHAO Yi-nan³

(1.Hunan University, Changsha 410082, China; 2.Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3.The 28th Institute of CETC, Nanjing 210014, China)

ABSTRACT: The work aims to summarize the origin and development trend of human-computer interaction design of air defense command and control system, and explore the method and framework of system development in the future. Based on the “human centered” design concept, the design task level of human-computer interaction interface of air defense command and control system was studied and the human-computer interaction interface was divided into: user behavior, interaction architecture and visual performance. The human-computer interaction design process of air defense system is sorted out through user investigation, interaction architecture research and visual design analysis. The content of human-computer interaction design corresponding to “perception-decision-operation” in air defense command and control system is proposed, and the main tasks of system interface design and information visualization design are summarized. Through the research of human-computer interaction design, the framework and goal of human-computer interaction design of air defense system are established, which improves the usability and aesthetics of the system, and enhances the efficiency of combat mission operation.

KEY WORDS: air defense; command and information system; human-computer interaction; interface; design process

指挥信息系统 (C4ISR System, 又被称为指挥控制系统 Command and Control System), 在 19 世纪 50

年代起源于防空作战领域^[1]。当前联合作战成为了作战指挥信息系统建设的主要趋势, 联合作战是将各个

收稿日期: 2020-10-21

基金项目: 中国电子科技集团第二十八研究所与清华大学联合科研项目 (20182000363)

作者简介: 罗建平 (1982—), 男, 湖南人, 博士, 湖南大学助理教授, 主要研究方向为高端装备创新设计、设计管理。

通信作者: 刘岗 (1984—), 男, 山东人, 博士, 清华大学助理研究员, 主要研究方向为人机交互设计。

军种统一在一个指挥控制体系之中，需要信息化网络的支撑，也需要发展相应的人机交互技术。目前应用于防空作战的指挥控制系统是联合作战体系的重点，是维护国家安全的重要屏障。该类系统的人机交互设计，主要的工作是研究人与控制系统的电子计算机、传感器、武器系统之间的各类信息呈现与传达，服务于指战人员，从提升系统易用性的角度，来提高战斗力。

1 防空指挥控制系统的历史演进

从研制意义上来看，现代计算机、互联网的诞生及人机交互理论的雏形，都是来源于军用指挥控制领域。世界第一台电子计算机 ENIAC 于 1946 年在美国研制成功，其目的是为美国陆军军械部阿伯特丁弹道研究实验室用于计算导弹的弹道轨迹^[2]。美国于 1958 年建成的“赛其”（SAGE, Semi-Automatic Ground Environment，半自动地面防空系统）是世界上第一个防空指挥控制系统，用于连接北美防空网络防范核袭击^[3]。1960 年，参与“赛其”系统开发的 J. C. R. Licklider 教授发表了《人机共生》（Man-Computer Symbiosis）论文^[4]，这成为了深刻影响人机交互领域的基础理论。

1964 年，美国的巴兰·保罗（Baran Paul）^[5]提出分布式网络化的军用数据链路，成为了分布式网络中心战的理论基础，见图 1。1969 年美国在国防部研究计划署（Advanced Research Projects Agency，ARPA）制定的协定下，建立了因特网的前身阿帕网（ARPANET），其直接目的是用于军事信息终端的连接。阿帕网诞生之后，网络中心战的概念得到了持续完善和发展。分布式网络中心战是网络中心战的一种形式，更加强调作战单元的分布式感知和分布式响应。图 1a 为中心化网络结构；图 1b 为去中心化网络结构；图 1c 为分布式网络结构。

随着计算机技术的升级，计算机逐渐在民用领域展现了巨大作用。1982 年国际计算机学会（ACM，

Association for Computing Machinery）成立了人机交互（Human Computer Interaction）专门兴趣小组^[6]，人机交互概念被正式提出，主要研究人与计算机的信息传递与控制反馈。1985 年战斗机领域产生了共生座舱^[7]（The Symbiotic Cockpit）及认知座舱（Cognitive Cockpit）理念，研究人与控制计算机的智能交互^[8]。

到 21 世纪，美国空军提出了“多传感器指挥控制星座”，后改称指挥控制星座或 C2 星座（C2 Constellation），用于支持网络中心战和“2020 联合设想”。指挥控制星座网络是在美国国家级网络中心栅格（传感器栅格、信息栅格、交战栅格）支持下的空军的专用网络中心栅格^[9]。现在已经发展成为覆盖全球、遍及陆海空天的全球信息栅格^[10]。

美军全球指挥与控制系统的的核心分系统之一的国防通信系统是一个由国防交换网（DSN, Defense Switched Network）、国防数据网（DDN, Defense Data Network）、国防卫星通信系统（DSCS, Defense Satellite Communications System）等三个子系统共同构成的国防通信网络，具有语音、数据、视频、文本等多种持久通信能力^[10]。系统的人机交互已经呈现智能化、多通路、多媒体、大跨度、大数据等特征。

2 防空系统交互架构与信息分层

2.1 人机交互设计需求

当前以网络中心战（Net-Centric Warfare）和联合作战（Joint Forces Operations）为代表的新型作战思想逐渐成为指挥控制领域的热点研究方向。网络中心战是联合作战的另一种形式，可定义为部队在战争背景下通过网络化而实现的指挥控制行动^[11]。

在网络中心战的背景下，系统通过大量传感器，产生大量多媒体数据，这些大数据产生的速度会超过人处理信息的速度，人机交互信息的优化提取展现出来巨大的需求。在新的智能化、大数据背景下，进行联合作战系统的人机交互设计研究成为系统设计的关键任务。

防空指挥控制系统具有天然的联合作战属性。防空系统连接了地、海、空、天内的各类其他硬件装备，包括潜艇、船舶、车辆、飞机、卫星等。俄罗斯于 2014 年底建成了国防指挥中心，统一指挥国家武装力量。中国于 2016 年 4 月公开了中央军委联合作战指挥中心，展示了联合作战指挥体系的建设成果。在中共十九大报告中提到：“打造坚强高效的战区联合作战指挥机构”，“加快军事智能化发展，提高基于网络信息体系的联合作战能力、全域作战能力”^[12]。

指挥控制系统是人机交互密集发生的系统，人机之间的融合与共生的依赖关系极为紧密。联合作战注重在信息化网络的支持下统一管理各军种，见图 2。联合作战指挥控制系统的信息化建设主要内容是人

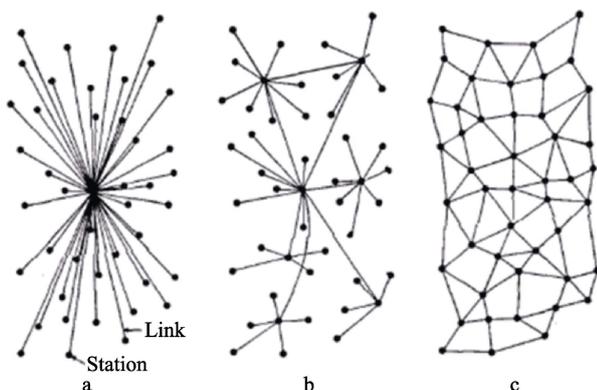


图 1 巴兰提出的分布式网络结构理论图示
Fig.1 Schematic diagram of distributed network structure theory put forward by Baran

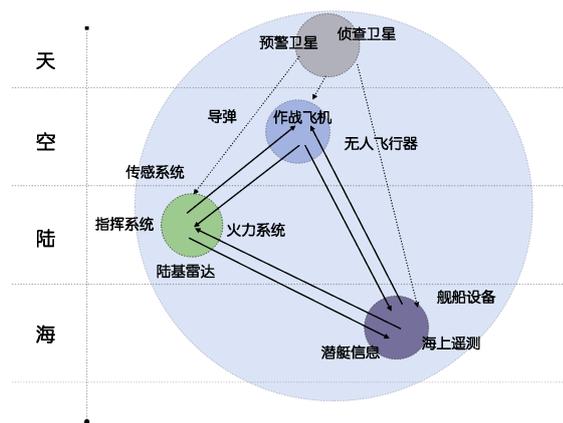


图2 联合作战多域空间的态势要素
Fig.2 Situation elements of multi-domain space in joint operations

与系统、设备的连接,促进“人一机一环”的整体协调,优化系统“人在回路”的效率。这其中,对人机交互和用户界面的设计都会产生大量需求。

2.2 防空系统人机交互设计

随着制空权在战争中的地位越来越重要,防空指挥控制系统(Air Defense Operations Center)在国家防御体系中的作用得到了空前的强化,多个国家把防空系统建设置于优先发展的地位^[8]。防空系统涵盖陆地与海洋边境防御系统、区域级国土防空系统、核心要地防护系统等防护体系,通过多重防护冗余来保障国家重要城市和重要场所的安全。

防空及反导弹指挥控制系统作为战场的指挥中枢,见图3,系统下辖的武器装备日益增多,各类信息不断增加,传感器数量持续增多并产生大量多媒体数据,系统态势越来越复杂,这给指战员的认知决策

能力带来了巨大的挑战。

指挥控制系统作为复杂的信息集成系统,主要依赖人机交互界面来完成与指战员的信息传递。进行人机交互研究及用户界面设计,目标是优化界面信息布局,降低指战员认知负荷,将各种信息有序排布,使其更容易被人所理解、判断,从而快速做出决策操作,提高“人一机一环”系统的整体效率。

作战人员对战场和战区环境、威胁和作战目标了解越全面越容易获得战争主动权。在目前高度动态的战场上,态势感知、指挥与控制、图像、信号情报和全动态视频的来源越来越广泛,美国诺斯罗普格鲁曼、洛克希德马丁等公司都在研发高性能的指挥、控制、通信、计算机、情报、监视和侦察(C4ISR)系统(见图4)^[13]。联合火力打击作战力量结构多元化,作战的功能多样化,各类应用系统化,整体的作战能力更为优秀。

战场环境信息、指挥系统信息、武器装备信息等各类信息上传下达是组成指挥控制过程的重要部分。在联合作战指挥控制系统中,系统依靠人机交互界面,接收与传递各类信息,确保指挥控制畅通和状态及时反馈。

信息管理是指挥过程中的必需部分。在指挥所中的指战员通过各种途径与产生数据的设备交互信息。这其中有数字用户界面代替物理设备用户界面,或是更加高级的增强现实(AR)与混合现实界面(MR)。增强现实(AR)界面中,当指战员靠近设备即向其显示定制的人机交互界面^[14]。其原理是通过图像编码的图像识别来实现对器件的识别,利用AR或沉浸式虚拟环境,可以对指挥中心进行数字化的环境重构。

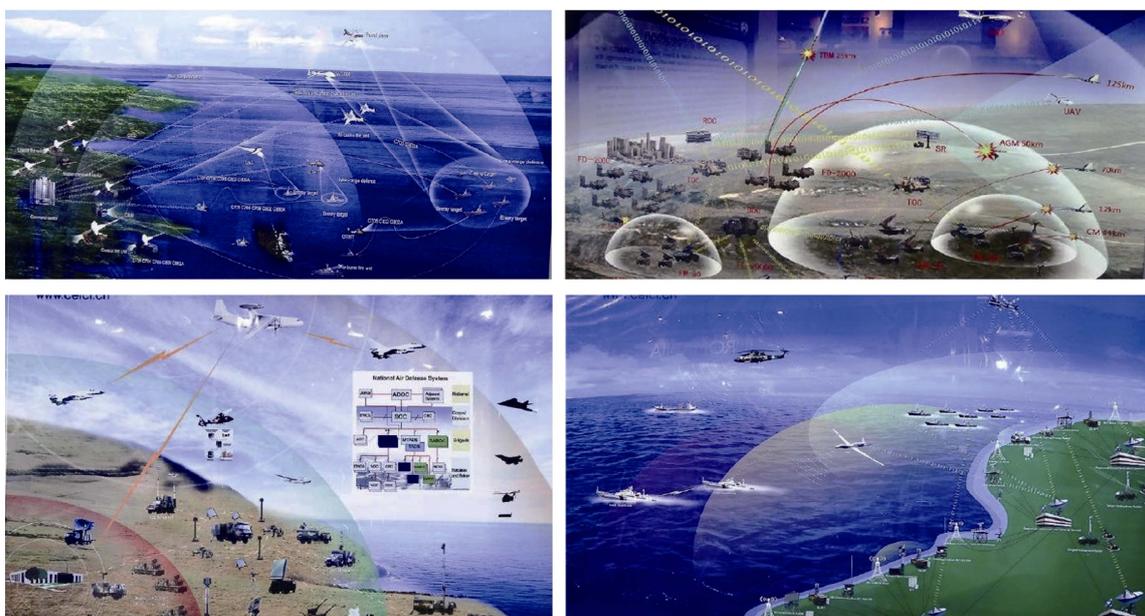


图3 中国各类防空系统体系架构
Fig.3 Architecture of various air defense systems in China

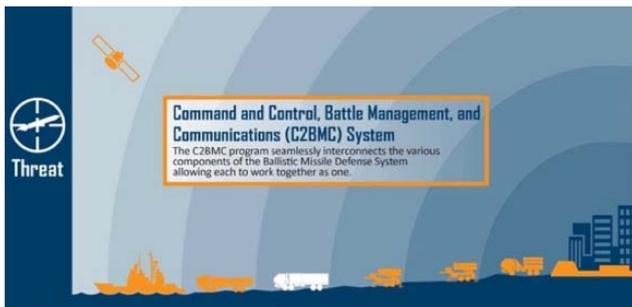


图 4 美国某防空系统武器分层防御演示
Fig.4 Demonstration of stratified defense of an air defense system in the United States

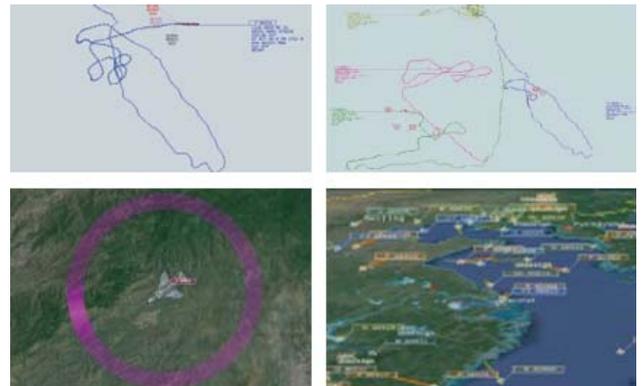


图 5 某防空系统二维及三维界面显示效果
Fig.5 Two-dimensional and three-dimensional interface display effect of an air defense system

3 数字化人机交互界面世界研究

3.1 战场的信息化与数字化

随着战争由陆权时代、海权时代发展到制空权时代，战机和导弹已经成为打击火力的主要载体，成为局部战争中超视距、战区外打击的主要手段。当前世界大多数国家面对的主要威胁来自空中（陆空、海空）方向，防空作战指挥控制系统已经是国家对外防御体系建设的首要考虑方向。防空作战指挥控制系统涵盖边境防御系统、国土防空系统、要地防护系统等防护体系，通过多重防护冗余来保障国家安全。指挥控制系统人机交互界面的设计质量将会直接影响指挥官做决定的效率^[3]。

基于网络信息体系的联合作战指挥控制系统，包含作战体系、信息化建设、网络信息体系建设等方面。基于联合作战指挥控制系统的人机交互及界面设计应同步开展。美国全球信息栅格与 C2 星座系统具有图像、数据、视频、文本等多种信息传输能力，通过终端的人机交互界面，这些多媒体信息可以被人员接收与处理^[4]。联合作战的指挥控制需要将海量态势信息转化为直观的可视化战场信息，提高战场指挥员的快速指挥决策能力。ISO 9241 标准《人机交互系统的人类工效学》提出了有效性（Effectiveness）、效率（Efficiency）和满意度（Satisfaction）的系统人机交互设计目标。

3.2 战场的信息化与数字化

由于人主要的信息来源于视觉，因此随着系统数字化的发展，信息的可视化设计是系统人机交互界面设计的重要工作。将大量数据信息转化为可视化信息，并被快速识别是可视化设计的关键。

防空指挥控制系统作为防空系统的指挥中枢，其人机交互界面是信息承载的空间，是最常用的信息显示环境，见图 5。

战场态势可视化显示是仿真系统必备的功能。防空三维可视化仿真系统划分为数据管理、军标管理、态势管理、场景显示四个功能模块^[15]。陈晓峰等^[16]

结合数据挖掘与可视化设计，建立了海战场态势数据可视化挖掘平台，以可视化方式为指战员报送战场态势信息，提高指战员指挥决策速度。

交互界面设计及信息可视化标绘图标是用户图形界面设计中的主要部分。其中，标绘图标是态势中的主要信息可视化指示符号，军用标绘在信息化战争中具有重要作用，可以把复杂的信息转化为用户易于理解和反应的图示。

战场可视化系统通过在地图上标绘各种带有特定意义的军事图形符号或标号来展现战场态势信息。标绘图标也被广泛运用于作战兵器推演、辅助指挥决策中。态势标绘是信息可视化中的重要部分，已有标绘的使用应准确和符合规范，同时标绘图标需要根据任务的多样性进行创新设计。在三维地图上可以采用三维建模与图形渲染显示标绘结果。

数字化战场带来的指挥控制系统的变革十分深刻，标绘图标等传统的标识工具仍然可以发挥作用。在数字界面设计过程中，除了应用现代设计技术，还应该广泛结合领域特征，对传统指挥方式进行研究和数字化改造提升。

4 交互架构与设计实践研究

联合作战是全体作战力量统一在一个指挥控制系统之中，系统的交互架构将会十分复杂。作为战区内最重要的防御体系组成部分，防空作战需要信息化网络的支撑，也需要对大量的数据进行组织，并对人机交互界面进行设计，对数据进行可视化设计，将复杂的数据转换为可以被迅速解读的信息。

防空指挥控制系统的使用者是各级指战员，因此指挥控制系统也必须建立“以指战员为中心”的设计理念。指挥控制系统需要首先解决系统功能问题，改善指战员的使用体验，减轻其操作负担与认知负荷，增加指战员“感知—决策—操作”过程的准确度与舒适度。指挥控制系统的研究任务，可以划分为用户行为、交互架构、视觉呈现等几个层次，分别对应用户

的“认知—决策—操作”交互模型。指挥控制系统人机界面设计的研究框架包含用户操作行为研究、交互逻辑框架构建、视觉界面图形设计三个方面^[17]，见图6。

指挥控制系统人机交互界面研究框架可以应用于信息分析过程的三个阶段，前期阶段为信息的整理阶段，中期阶段为信息分析阶段，后期阶段为信息展现阶段。整理与分析目的是对界面信息进行分层（见图7），按照重要程度与紧急程度进行排序并有序展现分析结果，例如告警信息与安全态势信息应该置于重要位置，地图态势信息不应被弹出框遮挡。

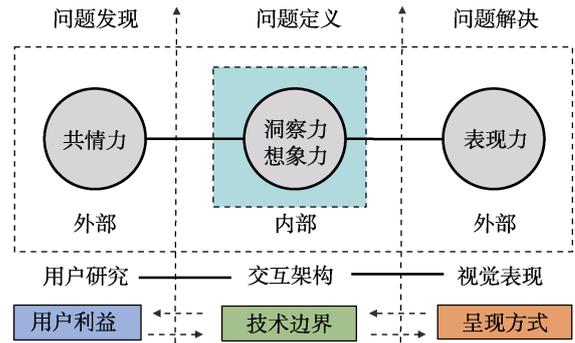


图6 问题发现、定义与解决框架
Fig.6 Problem discovery, definition and solution framework

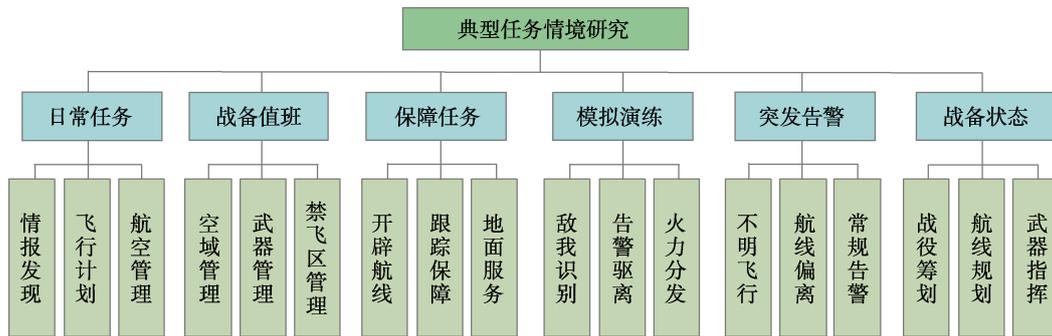


图7 典型任务情境研究
Fig.7 Typical task situation research

系统交互架构的设计目标是提升系统的可用性，提高系统指战员在使用过程中的用户体验满意度。“以指战员为中心”的设计理念即是以人的认知与行为特征为视角进行系统设计。

用户图形化显示界面，一般应依据相对完善的系统架构来进行设计，用户图形界面的最终呈现是用户研究、功能架构的视觉化体现部分。防空指挥控制系统的用户图形界面往往是基于地理信息系统，在地理信息系统的基础上结合功能布局、界面风格、信息可视化等多种内容，统一进行设计与呈现^[18]，例如在某空海一体联合防御系统设计过程中就充分考虑了各种界面显示内容的设计，最终呈现了良好的应用效果，见图8。



图8 联合防御系统战区空中作战席位
Fig.8 Air combat seat map of joint defense system theater

5 结语

本研究整理了作战指挥控制系统的起源及其与人机交互设计的关系，总结了以防空系统为代表的联合作战指挥控制系统人机交互设计的趋势。指挥控制系统是多兵种联合作战和网络中心战的指挥核心，系统与指战员之间最重要的人机交互需求是对海量信息准确高效的呈现，以及精准及时的命令反馈。防空指挥控制系统人机交互界面设计必须遵循“以指战员为中心”的设计理念。基于这一理念，人机交互界面应以用户操作行为、心理特征和业务习惯为基础，提出创新设计方案，并应用模块化、可组合的界面布局技术适应复杂的多维度需求。

防空指挥控制系统人机交互界面的设计目标是把交互主体—指战员、交互载体—指控系统、交互影响体—任务环境三者有机统一，让指战员更加熟练地掌握系统，更加高效地完成任务，同时在使用过程中产生良好的使用体验，从而有效提升指战员的作战指挥效率。

参考文献：

[1] 刘岗, 陈超, 赵轶男, 等. 作战指挥控制系统人机交互设计流程研究[J]. 包装工程, 2020, 41(14): 85-91.
LIU Gang, CHEN Chao, ZHAO Yi-nan, et al. Human-Computer Interaction Design Process of Command and

- Control System[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(14): 85-91.
- [2] 戴维.卡门斯, 凯文.J.科根, 雷蒙德.G.德卢西奥. 美军网络中心战案例研究 2[M]. 北京: 航空工业出版社, 2016.
- CAMMONS D, COGAN K J, DELUCIO R D. Network Centric Warfare Case Study 2[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2016.
- [3] 黄力, 罗爱民, 邱涤珊, 等. C~4ISR 体系结构框架研究进展[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(3): 16-23.
- HUANG Li, Luo Ai-min, Qiu Di-shan, et al. Advances on C4ISR Architecture Framework[J]. Fire Control & Command Control, 2004, 29(3): 16-23.
- [4] LICKLIDER J C R. Man-Computer Symbiosis[J]. Transactions on Human Factors in Electronics, 1960, HFE1(1): 4-11.
- [5] BARAN P. On Distributed Communications Networks[J]. IEEE Transactions on Communications Systems, 1964, 12(1): 1-9.
- [6] 顾振宇. 交互设计——原理与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- GU Zhen-yu. Principals & Processes of Interaction Design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [7] REISING J M, MOSS R W. 2010: The Symbiotic Cockpit[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1986, 1(1): 24-27
- [8] WALSDORF A, ONKEN R. Cognitive Man-machine-cooperation: Modeling Operators' General Objectives and Its Role within a Cockpit Assistant System[C]. Nashville: IEEE International Conference on Systems, 2000.
- [9] 蓝羽石, 刘兴. 网络中心化联合作战体系作战能力及其计算[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- LAN Yu-shi, LIU Xing. Operation Capability and Its Calculation of Network Centricity Joint Operation System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [10] 任国军. 美军联合作战情报支援研究[M]. 北京: 军事科学出版社, 2010.
- REN Guo-jun. A Study on Intelligence Support to Joint Operations of the U.S. Armed Forces[M]. Beijing: Military Science Press, 2010.
- [11] 蓝羽石, 赵克俭, 郭成昊, 等. 未来指挥控制系统暨信息处理系统架构[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(1): 30-40.
- LAN Yu-shi, ZHAO Ke-jian, GUO Cheng-hao, et al. The System Framework of Future Command and Control and Information Processing System[J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(1): 30-40.
- [12] 习近平. 在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告[M]. 北京: 人民出版社, 2017.
- XI Jin-ping. Report on the 19th National Congress of the Communist Party of China[M]. Beijing: People's Publishing House, 2017.
- [13] ATHAR R, MATTHEWS T, LAVIGNE J, et al. Stratospheric C4ISR Unmanned Station[C]. Denver: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc (AIAA), 2017.
- [14] MACIEJEWSKI M, POMIANEK M, SZUSTAKOWSKI M, et al. Tools Virtualization for Command and Control Systems[C]. Warsaw: SPIE, 2017.
- [15] 闫冲冲, 郝永生, 葛志军, 等. 基于 EV-Globe 的单兵防空作战三维可视化仿真系统设计[J]. 电子设计工程, 2012, 20(4): 38-41.
- YAN Chong-chong, HAO Yong-sheng, GE Zhi-jun, et al. Design of Solo-soldier 3D Visualization Simulation in Aerial Defense System Based on EV-Globe[J]. Electronic Design Engineering 2012, 20(4): 38-41.
- [16] 陈晓峰, 刘兴, 高元博, 等. 基于数据挖掘的海战场态势可视化平台构建[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(4): 144-147.
- CHEN Xiao-feng, LIU Xing, GAO Yuan-bo, et al. Structure for Naval Battlefield Situation Visualization Platform Based on Data Mining[J]. Fire Control & Command Control, 2015, 40(4): 144-147.
- [17] LIU Gang, SU Yi. Study on Big Data Visualization of Joint Operation Command and Control System[C]. Berlin: Springer, 2018.
- [18] 刘岗, 赵轶男, 孙裔申, 等. 指挥信息系统人机交互设计中的用户研究方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2020, 32(11): 1765-1772.
- LIU Gang, ZHAO Yi-nan, SUN Yi-shen, et al. User Research Method in Human-Computer Interaction Design of Command and Control System[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2020, 32(11): 1765-1772.