

文章编号: 1674-8190(2024)01-141-08

# 飞机智慧座舱发展技术研究

刘光辉, 孙迪, 李园园

(航空工业第一飞机设计研究院 结构设计研究所, 西安 710089)

**摘要:** 未来飞机座舱智慧化转型是必然趋势, 研究飞机智慧座舱发展技术能够为未来飞机智慧座舱的设计提供参考支撑。本文探讨了智能与智慧的区别, 提出了飞机智慧座舱的概念与设计内涵, 总结出深度感知与沉浸式交互、类人的认知及开放性与个性化定制服务的智慧座舱功能设计要素; 梳理了发展飞机智慧座舱亟需解决的五项关键技术: 多维度深度信息感知与融合技术、先进信息显示技术、沉浸式自然交互技术、智能态势认知技术、多智能体自主适应技术。通过关键技术的分析对未来飞机智慧座舱的发展提出了新的思考。

**关键词:** 智能座舱; 智慧座舱; 深度感知; 沉浸式交互; 智能态势认知; 个性化定制

**中图分类号:** V223

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.01.16

## Study on development technology of aircraft smart cockpit

LIU Guanghui, SUN Di, LI Yuanyuan

(Structural Design Institute, AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** It is clear that the smart development of the aircraft cockpit is inevitable, and the study on the development technology of aircraft smart cockpit can provide the reference support for future aircraft smart cockpit design. The differences between intelligent and wisdom are explored in this paper, and the concept and design of the smart cockpit is put forward. Depth perception and immersion of the interaction, the category of cognitive, openness and personalized customization services of the smart cockpit design elements are summarized. Five key technologies which should be urgently solved for the development of aircraft smart cockpit are put forward, including multidimensional depth information perception and fusion technology, advanced information display technology, immersion natural interaction technology, intelligent situation cognitive technology and multi-intelligent independent adaptability technology. The analysis of key technologies can provide a new thinking about the design of the aircraft smart cockpit.

**Key words:** intelligent cockpit; smart cockpit; depth perception; immersion of the interaction; intelligent situation cognitive; personalized customization

收稿日期: 2023-06-03; 修回日期: 2023-10-12

通信作者: 刘光辉(1994-), 男, 硕士, 工程师。E-mail: 15996311127@163.com

引用格式: 刘光辉, 孙迪, 李园园. 飞机智慧座舱发展技术研究[J]. 航空工程进展, 2024, 15(1): 141-148.

LIU Guanghui, SUN Di, LI Yuanyuan. Study on development technology of aircraft smart cockpit[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(1): 141-148. (in Chinese)

## 0 引言

飞机座舱是机上各类机载设备、信息的汇总中心,是飞行机组成员操纵飞机的唯一一人一机交互空间,是飞机一切活动的指令中枢。作为一个复杂多变的环境空间,它具有设备规模大、组分多、层次多、信息动态综合等特性,身处其中的飞行机组成员无时无刻不与其进行密切交互:眼睛获取舱内显示器和仪表信息(包括姿态、速度、高度等飞机状态信息,航向、到达时间等航路状态信息,多个主要系统状态信息,地形、气象等信息);耳朵获取声音告警、指令等信息;手用于操作操纵杆、油门杆等,同时还要根据飞行状态操作顶控板、中央操纵台、侧操纵台上数百个控制按键和开关;脚也要随时操纵脚踏;脑需要根据飞行任务、实时飞行场景、外部指令等判断飞机状态、做出决策、发出指令等。飞机座舱对于飞行机组成员而言,其内发生的人—机、人—环、人—人的交互设计,时刻影响其生理心理状态;对于设计师而言,毫无疑问是一个面向人因工程、系统工程等复杂系统,其综合设计水平是保障飞行安全、任务执行效能的关键<sup>[1]</sup>。

伴随着海、陆、空、地多领域联合作战的发展,未来战场中的信息量爆炸式增加,飞行机组成员将面临着海量的多源战场资源、信息综合处理能力的挑战,传统的战场信息采集、信息处理方式及人一机交互方式等凸显出其局限性<sup>[2]</sup>,未来飞机座舱的人为因素问题将更加突出。

本文总结不同时期飞机座舱的变化历程及设计特点,得出飞机座舱发展的核心问题在于人一机关系的改善,提出了基于飞机智慧座舱概念的解决路径,并分析了其设计内涵、功能设计要素及关键技术,旨在通过多种通道先进技术的综合应用有效增强座舱感知与显示等能力,实现人与座舱的高效自然交互,实现智能辅助决策能力,以降低飞行机组成员的操作难度和工作负荷,真正实现以人为本、人机共融,进而提升飞机整体的作战效能。

## 1 飞机座舱变化历程

从军民用飞机座舱的发展历程可以看出,目

前飞机座舱的演变共经历了三个阶段。

### 1.1 机械电气式座舱阶段

信息显示以机械式、电气式显示器为主,利用显示部件间的相对运动来显示数值,如指针一刻度盘等。闫智武等<sup>[3]</sup>认为该类显示器结构相对简单,但仪表显示多为单一的飞行参数信息,如转速表、空速表等。且该类仪表精度低、寿命短,单一数据的显示致使舱内仪表数量多,舱内显得拥挤不堪。机组成员只能通过目视观察仪表指针来获取飞行状态参数,此外机组成员必须拥有良好的个人能力、高质量的配合及沟通效率,才能确保飞行参数信息与飞行操控之间合理配合。因此飞行机组的工作载荷大,易发生飞行事故。典型机械电气式座舱结构如图1所示。



图1 典型机械电气式座舱<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Typical mechanical electrical cockpit<sup>[4]</sup>

### 1.2 玻璃座舱阶段

玻璃座舱的诞生依赖于电子综合显示器的产生,该阶段被细分为电子显示仪表驾驶舱、玻璃座舱、彩色液晶显示驾驶舱。刘相彤<sup>[5]</sup>认为电子综合显示仪表改善了传统机械电气式仪表所造成的座舱布置混乱状态,电子显示仪表显示信息多,可实现一表多用、按需显示、综合显示,座舱内仪表数量大量减少,布局更加简洁,便于观察,此外显示精度与可靠性也得到提升,飞机功能实现更加自动化。飞行机组能够快速读取到相关信息,有效减轻了飞行机组的工作负荷,缩短了机组反应时间,提升了作战效能。应用早期电子仪表显示器

的飞机以波音 B757/B767、空客 A310 飞机为主。在早期电子仪表综合显示器的发展基础上,为了解决显示器小、集成度低、整体性差、人机设计不合理等问题,诞生了以 A320 为典型的玻璃驾驶舱及以 A380 为典型的彩色液晶显示驾驶舱,如图 2~图 3 所示。



图 2 A320 驾驶舱——典型玻璃座舱驾驶舱<sup>[4]</sup>  
Fig. 2 A320 cockpit: typical glass cockpit<sup>[4]</sup>



图 3 A380 驾驶舱——典型彩色液晶显示驾驶舱<sup>[4]</sup>  
Fig. 3 A380 cockpit: typical color liquid crystal display cockpit<sup>[4]</sup>

### 1.3 智能座舱概念阶段

玻璃座舱中人员与信息的交互仍主要依靠单一的视觉途径,但未来战场上飞行机组将接收呈几何倍数级别增长的信息量,人脑处理信息的能力有限,部分关键信息被忽略的可能性大幅提升,从而影响飞行安全。为了更好地适应未来战场,飞行机组要求座舱能够更全面、更智能地辅助机组完成任务,缩短思考时间,提高作战效能,降低人员工作负荷,因此伴随着人工智能、大数据、智能交互技术、生理传感等技术的快速发展,智能座舱的概念顺势而生,如图 4 所示。

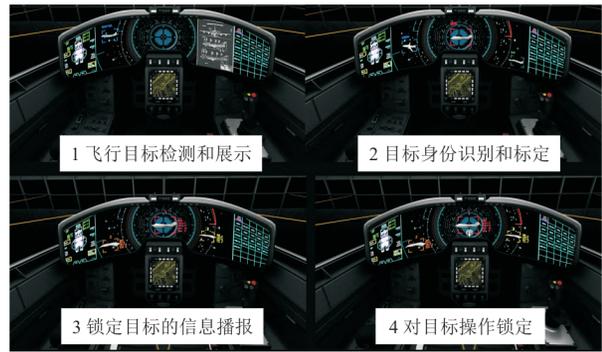


图 4 典型智能座舱<sup>[6]</sup>  
Fig. 4 Typical intelligent cockpit<sup>[6]</sup>

### 1.4 发展内因分析

在机械电气式座舱阶段,机器是被人使用的工具,它无法理解人的需求,需要人适应机器的使用方式。在玻璃座舱阶段,人与机器的交流语言相对自然,但交互方式单一,容易产生疲惫感,是处于人适应机器与机器满足人共存的阶段。智能座舱的出现促使人与机器的交互更为综合与自然,机器充当人的智能副驾驶,利用机器本身的理性,减轻机组人员在面临复杂空战时的工作负荷,引导机组人员从容决策和对抗。整个座舱历程的变化本质在于满足作战需求,实现人一机关系“质”的飞越。

## 2 智能座舱与智慧座舱

### 2.1 智能座舱

针对智能座舱,任宝平等<sup>[7]</sup>深入探索了智能座舱机载系统的智能架构及功能,提出了一种云一边一端的智能架构方案,提升了座舱的智能化程度;殷春霞等<sup>[8]</sup>认为智能座舱应是以机组为中心,优先考虑态势感知,并做到任何特定瞬间的信息均能够被飞行员所接受,支持武器即插即用,支持多通道控制,座舱具有类似于人的思维推理能力;吴佳驹等<sup>[9]</sup>提出了智能座舱应能够充分利用传感器新技术、智能算法和操纵机构等新技术,实现座舱智能显示、智能决策和智能操纵;吴文海等<sup>[10]</sup>认为智能座舱应具有智能性、交互性与可维护性,并提出了新一代智能座舱总体结构设计方案。国内研究者普遍认为智能座舱是将人工智能、数字化、先进传感、智能交互等技术应用到飞机座舱中,实现飞机座舱的全面感知、智能交互、辅助决策等功能。因此智能座舱的设计内涵可简述为:

以机组成员为中心,通过人一机一环的智能融合,实现座舱的多维化智能感知、智能化辅助决策及人一机一环的自然交互功能,实现座舱向智能副驾驶的角色转变。

## 2.2 智慧座舱

还有研究者认为智能化只是智慧化的基础,智慧化才是技术发展的最终目标。陈如明<sup>[11]</sup>指出“智”是智能化、自动化、自学习、自组织、自适应化,是智商的表征,“慧”是人的灵性/悟性、人文化、变革力、创造性,是情商与变商的结合,“智慧”与“智能”相比确属更高层次;Peterson等<sup>[12]</sup>将智慧与智力分离开来,认为智慧代表着更高水平的知识、判断和给出建议的能力;刘革平等<sup>[13]</sup>从技术发展角度指出人的智慧使技术不断走向智能化,技术的整合与使用也成为人发展智慧的重要支撑。据此,不少行业提出“智慧+”的概念,如智慧校园、智慧城市等。初景利等<sup>[14]</sup>解释了智能图书馆与智慧图书馆的区别与联系,明确了智能是智慧的第一步,智慧是智能的演进;王飞等<sup>[15]</sup>指出了智慧服务的研究已经逐渐由重“智”轻“慧”向技术与人文的交互过渡,提升服务质量已然是智慧服务的研究重点。

综上所述,智慧与智能的区别主要在于智能以物为主导,强调机器的理性与逻辑,而智慧以人为主导,强调人的智慧与物的智能发展融合。据此提出飞机智慧座舱的内涵:面对不断开发的人类智慧,同时为满足飞行机组深层次需求,飞机座舱应具有深度感知能力,拥有类似于人的学习、思维、伦理、价值、创造等认知特性;作为开放的、类人的智慧平台,快速、准确、高效捕获飞行机组深层次需求,高质量、人性化反馈作战信息,辅助飞行机组决策,使人与座舱交互如同与真人交互一样自然,真正实现所想即所得,实现智慧作战。

## 3 智慧化座舱的功能要素

### 3.1 深度感知与沉浸式交互

一切智能从感知开始。李程等<sup>[16]</sup>认为战场上的智能感知是人工智能与无人作战理论的交叉融合,通过人工智能手段实现战场环境的多元智能感知。飞机智慧座舱利用人工智能检测算法及多维度的先进传感器模拟人体感知系统(如视觉、听觉、触觉等)及模拟人类无法获取的感知方式(红

外传感等),重点感知舱外及舱内环境态势(外界战场环境信息、舱内设备系统运行状况、舱内综合环境信息等)、人员状态(人员行为数据、生理心理状态等),为后续的智能运算、信息处理、交互与决策提供数据基础。

人与座舱交互是实现指挥与决策的前提。目前,语音、手势、眼动等新型人一机交互技术已在多种智能平台上得到应用,并展示出其高效性。高昱<sup>[17]</sup>提出将沉浸式交互、多通道交互、人一机融合智能交互、情感计算4种新型人一机交互技术应用于下一代指挥控制系统,以此来提高指挥控制过程的自然性、高效性和可靠性。结合飞机智慧座舱的框架,将全景显示、图像拼接、智能告警等技术融入到座舱设计中,构建多维度的沉浸式显示及告警系统,并整合运用脑控、眼控、手势、体感、语音等新型交互方式,共同构建沉浸式的多维度、多通道的智能交互界面,让飞行机组沉浸式感知与捕获作战信息,支撑战场上的快速感知与敏捷对抗。

### 3.2 类人的认知

如今飞机座舱中,人负责大部分的决策与推理,但人的生理与心理受环境影响较大,而机器的逻辑性与精确性等特性决定其能够消除认知偏差,快速提供合适方案<sup>[17]</sup>。飞机智慧座舱要求人与座舱深度融合,要求座舱具有类似于人的认知能力,即适应与学习能力、语言与行为反馈能力、决策与执行能力、反思与自我监控能力等,以实现人与座舱的协同深度融合。通过以深度感知及沉浸式交互状态下的信息数据为基石,依托战场环境、系统数据、人员生理与心理等基础大数据,深度挖掘各类作战场景下机组成员决策的顺序与时机,构建智慧辅助决策系统。该系统能够依靠不断积累的大数据进行自主深度学习,通过综合分析真实战场下飞机的系统信息、环境信息、机组成员状态信息等态势信息,提出可自适应调整的辅助作战方案,此时智慧座舱相当于一个战场辅助决策专家。

### 3.3 开放性、个性化定制服务

以飞机座舱内交互界面为例,飞行机组成员对其图符、色彩、布局、风格样式等的喜好及耐受程度因人而异。刘志方等<sup>[18]</sup>测试了飞机仪表平视显示系统和下视显示系统的可用性特性,发现两种显示系统的可用性受个人经验调整影响。因此

飞机智慧座舱应能够提供面向不同飞行机组的智能个性化定制服务。根据不同飞行机组成员的操作习惯、操作特点、人员个性、交互喜好等,不同的作战任务、不同的机型、不同的战术等自适应调整智能化程度,实现人与座舱的高度互补、融合。

## 4 亟需解决的关键技术

飞机智慧座舱的构建核心在于兼顾人的智慧与物的智能,实现人与物的深度融合,减轻工作负荷,提高作战效能。为实现上述目标,亟需研究飞机智慧座舱的 5 个关键技术:多维度深度信息感知与融合技术、先进信息显示技术、沉浸式自然交互技术、智能态势认知技术、多智能体自主适应技术。

### 4.1 多维度深度信息感知与融合技术

一切智能从感知开始。在全域战场上,战场信息来源分散、复杂多维、多元异构,信息来源十分碎片化;舱内系统设备运行状态、舱内环境等直接影响人员生理与心理状态,从而影响任务执行的质量与效率。多维度深度信息感知技术能够更快、更准、更全面地感知战场、飞机座舱、人员状态信息。数据融合作为感知信息的后处理过程,能够将多个传感器和信息源的数据、信息加以关联、相关和组合。信息感知与融合技术能够实时提供多维的战场感知信息,从而给出战场环境的综合态势,为战争指挥提供强大有力的信息保障<sup>[19]</sup>。

多传感器信息感知与数据融合技术早已被美国列为重点开发的 20 项关键技术之一(如图 5 所示),美国已经结合各兵种作战需求,开发了几十个军用数据融合系统,充分证明了该技术的必要性与先进性。

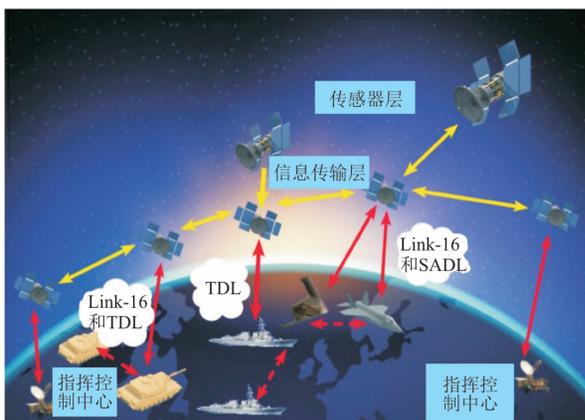


图 5 美国信息感知技术示意<sup>[20]</sup>

Fig. 5 American information awareness technology<sup>[20]</sup>

### 4.2 先进信息显示技术

视觉是飞行人员操纵飞机、获取信息的重要通道,在数字化作战模式下,未来飞机座舱需要向飞行员提供更丰富的导航、任务、战场姿态等信息以支持高效作战,因此新型的信息显示技术正飞速发展<sup>[21]</sup>。

美国空军研究实验室 1990 年提出“全景座舱控制和显示系统”计划,通过图像拼接技术,采用大屏幕显示全屏或分屏图像,实现整个飞行过程中所需的数字地图、全景图像或系统状态显示。不过仅支持二维平面视图显示的全景显示并不能完全满足飞行员对更直观、准确信息数据的需求,因此多维立体显示技术应运而生。其中三维显示技术依据人眼立体视觉特性将空间场景与物体以三维图像信息的形式再现,能够激活用户的三维空间知觉,并增强沉浸感和临场感,如基于三维显示技术的沉浸式头盔显示器以飞行员虚拟视网膜显示为基础,完成战场环境构建与信息显示<sup>[9]</sup>。美国已经将三维显示技术应用在最新的贝尔倾转旋翼机 V280 中,该机具有全屏显示系统,还可将数据投影于风挡玻璃,飞机能够自动根据飞行状态显示信息,并且可与虚拟显示智能头盔构成多重信息显示<sup>[22]</sup>,如图 6 所示。



图 6 V280 驾驶舱<sup>[8]</sup>

Fig. 6 V280 cockpit<sup>[8]</sup>

最新的全景、思维信息显示技术在原三维立体显示的基础上增加了预知、预报信息,在飞行员获取真实三维图像信息的同时帮助预见未来飞机轨迹及飞机状态,大幅提升了飞行员对目标和危险的识别能力,帮助飞行员提升复杂任务模式下的作战能力<sup>[23]</sup>,该技术是未来信息显示技术的重要发展趋势。

### 4.3 沉浸式自然交互技术

沉浸式自然交互技术更重视机组成员的直觉与感官,该技术深入探寻与追踪机组成员的潜意识需求,运用多感官、多模态的界面方案,配合虚拟现实、全息显示技术打造的沉浸式交互空间,带给用户更真实、更自然的互动体验。例如当飞机某侧外油箱漏油时,飞行员可以听到对应部位的漏油声;飞行员可以通过具有振动传感器的特殊服装,通过振动频率,快速、直观地了解飞行器姿态等信息<sup>[8]</sup>。美军沉浸式模拟训练系统如图 7 所示。



图 7 美军沉浸式模拟训练系统<sup>[24]</sup>

Fig. 7 American immersion simulation training system<sup>[24]</sup>

在自然交互方面,国内外在手势、语音、触觉反馈、生理计算等人机自然交互技术的理论研究较多,比如在触觉反馈领域,法国 Robles-De-La-Torre 等<sup>[25]</sup>发表了表面触觉感知的研究成果,促进了可穿戴移动设备实现触觉再现的发展,日本、美

国、芬兰等国家均已验证了可穿戴移动终端实现裸指触觉再现的可行性。但大多数研究方案在正确率以及效率上不能满足多媒体终端的应用需求。

在基于虚拟现实的沉浸式显示方面,美国国防部高级研究计划局、各兵种作战实验室等均已将虚拟现实技术应用到作战指挥决策领域,一方面通过收集的情报构建逼真的三维战场环境,另一方面通过基于虚拟现实的作战方案分析系统对决策方案进行仿真分析,并作为作战参考。例如美国国防部高级研究计划局开发的未来装甲车辆虚拟座舱项目,美国海军的全息虚拟指挥中心等<sup>[26]</sup>。

### 4.4 智能态势认知技术

联合作战下产生的海量、多源、异构、复杂的态势信息,传统的处理方式已经无法承载,以致于无法形成有效的态势认知以辅助决策,因此利用人工智能赋能态势认知是重要的研究方向。基于大量的态势数据,飞机智慧座舱将不断进行特征提取、自主学习,构建飞机座舱态势知识体系,结合战场上实时感知的关联数据,利用飞机智慧座舱的智能推理能力进行目标运行轨迹分析、形式预测判断等,并借助沉浸式交互座舱进行智能展示,利用全面、高效、精准、深入的智能化态势认知能力,辅助飞行机组高质量决策。美国国防部高级研究计划局推进的“深绿”指挥控制领域研究项目如图 8 所示,其中 COA 为精略行动计划, FBCB2 为 21 世纪部队旅及旅以下作战指挥, PASS 为有源空间监视系统。

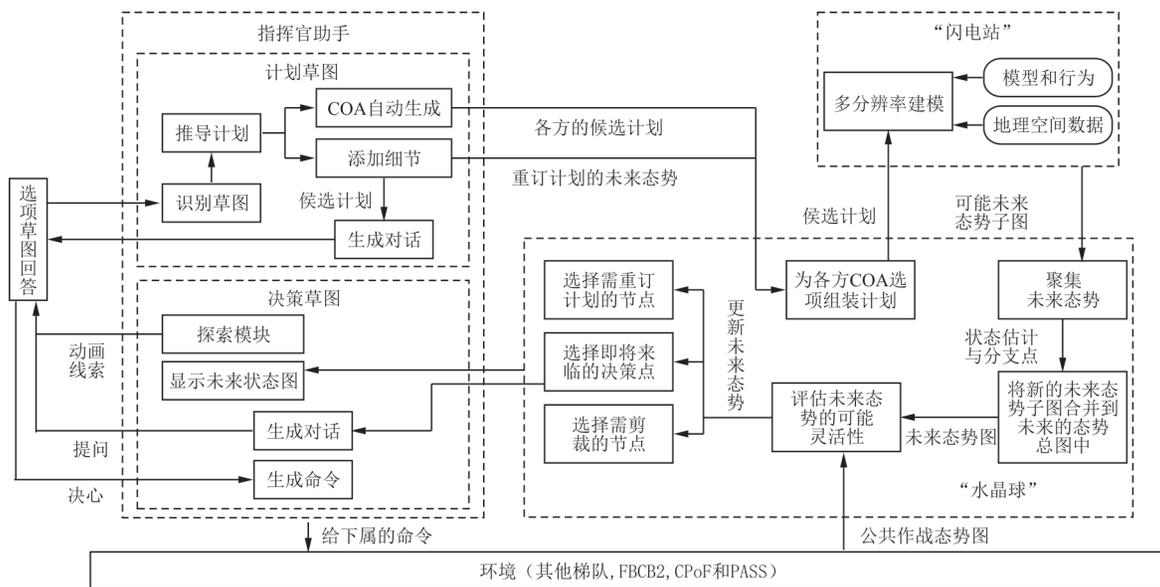


图 8 “深绿”指挥控制领域研究项目<sup>[27]</sup>

Fig. 8 DEEP GREEN Plan<sup>[27]</sup>

在智能态势认知方面,2016年美国已启动指挥官虚拟参谋项目,旨在通过综合应用人工智能等技术,应对海量态势数据,提供主动建议、高级分析等能力,从而为智慧人员提供全流程的决策支持。宋志滢等<sup>[28]</sup>提出了一种基于大数据的军事情报分析与服务系统框架,并设计了陆军指挥所模型自主生成作战计划的方法,该技术应用空间很大,但距离大规模应用还有一定空间。

#### 4.5 多智能体自主适应技术

现如今一个定型型号的飞机座舱内设系统状态等基本已固化,但真实的应用中座舱将面临着不同作战任务、不同机组成员、不同操作习惯、不同作战环境等带来的不确定性,以上因素要求座舱应具有良好的可维护性与自适应性<sup>[29]</sup>。飞机智慧座舱内的智能系统应根据不同的作战条件,自适应调整其智能化程度,实现舱内多智能体的自主适应,实现人与座舱的高度互补,这也是实现座舱开放性、个性化作战的关键所在。

现有技术很难设计出一个能够有效适应所有环境的自主飞机智慧座舱,这将是一个复杂的系统工程研究。多智能体系统的概念便是通过通信网络协调多个不同认知属性的智能体或者智能系统完成任务,类似于飞机智慧座舱的“大脑”,可模拟人脑进行细致入微的工作分配、工作协同等。

该技术目前主要应用于智能机器人群体控制领域,如Dorigo等<sup>[30]</sup>提出的群机器人是一种创新的群体机器人系统,用于协作完成运输任务。群体机器人在移动过程中保持一定的编队形态,在接近目标点之后通过变换形状来辅助完成任务。由于智能机器人与智能系统同为智能体,这种群体机器人的工作模式为飞机智慧座舱中智能系统的自适应设计提供了思路。

## 5 结束语

本文通过对飞机座舱历程、智能化与智慧化的探索,牵引出飞机智慧座舱的概念及设计内涵,提出了以人为本的飞机智慧座舱应能够满足未来作战所需的深度态势感知及认知功能,并为飞行机组提供沉浸式的自然交互环境,真正实现作战中的所想即所得,提高作战效能与作战质量。在未来型号研制过程中,可以结合所提出的飞机智慧座舱的三个功能要素及五项亟需解决的关键技

术开展研究工作,逐步提高技术成熟度。

### 参考文献

- [1] 刘光辉. 军用飞机座舱内饰结构的人因设计要素分析[J]. 江苏航空, 2021(3): 37-38.  
LIU Guanghui. Analysis of the decorative structure of the military aircraft cockpit[J]. Jiangsu Aviation, 2021(3): 37-38. (in Chinese)
- [2] 贾奋励, 王光霞, 田江鹏, 等. 面向全域作战态势感知的战场全息地图[J]. 指挥与控制学报, 2022, 8(1): 30-36.  
JIA Fenli, WANG Guangxia, TIAN Jiangpeng, et al. Pan-information map of battlespace for all-domain operation situational awareness [J]. Journal of Command and Control, 2022, 8(1): 30-36. (in Chinese)
- [3] 闫智武, 李成贵. 飞机座舱仪表显示器的发展概况[J]. 现代显示, 2005(2): 22-25.  
YAN Zhiwu, LI Chenggui. Development survey of the cockpit display[J]. Advanced Display, 2005(2): 22-25. (in Chinese)
- [4] 段林. 驾驶舱人机界面演变与发展趋势[J]. 民用飞机设计与研究, 2017(1): 7-11.  
DUAN Lin. The evolution and development of the flight deck human-machine interface [J]. Civil Aircraft Design & Research, 2017(1): 7-11. (in Chinese)
- [5] 刘相彤. 小型飞机驾驶舱显控界面优化设计研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.  
LIU Xiangtong. The optimization of display interface in light aircraft cockpit [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018. (in Chinese)
- [6] 赵丹华, 薛仲杰, 谭征宇, 等. 基于战场时空信息一体化的战斗机智能座舱[J]. 包装工程, 2022, 43(14): 1-16.  
ZHAO Danhua, XUE Zhongjie, TAN Zhengyu, et al. Space-time information-based integrated battlefield fighter cockpit design [J]. Packaging Engineering, 2022, 43(14): 1-16. (in Chinese)
- [7] 任宝平, 李创. 机载设备的智能架构及功能分析[J]. 航空工程进展, 2023, 14(4): 149-157.  
REN Baoping, LI Chuang. Analysis on intelligent architecture and function of airborne system [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(4): 149-157. (in Chinese)
- [8] 殷春霞, 陈晓刚. 作战飞机智能座舱研究[J]. 测控技术, 2021, 40(9): 1-5.  
YIN Chunxia, CHEN Xiaogang. Intelligent cockpit of combat aircraft [J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(9): 1-5. (in Chinese)
- [9] 吴佳驹, 苏幸君. 飞机智能座舱发展研究[J]. 航空电子技术, 2022, 53(1): 8-14.  
WU Jiaju, SU Xingjun. Research on the development of aircraft intelligent cockpit [J]. Avionics Technology, 2022, 53(1): 8-14. (in Chinese)
- [10] 吴文海, 张源原, 刘锦涛, 等. 新一代智能座舱总体结构设计[J]. 航空学报, 2015, 37(1): 290-299.  
WU Wenhai, ZHANG Yuanyuan, LIU Jintao, et al. Overall architecture design of new generation intelligent cockpit [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 37(1): 290-299. (in Chinese)

- [11] 陈如明. 智能、智慧及人工智能发展问题与向超级人工智能迈进的务实发展策略[J]. 数字通信世界, 2016(10): 33-42. CHEN Ruming. Intelligence, smart and artificial intelligence development issues and practical development strategies towards super artificial intelligence[J]. Digital Communication World, 2016(10): 33-42. (in Chinese)
- [12] PETERSON C, SELIGMAN M E P. Character strengths and virtues: a handbook and classification[M]. Washington, DC: American Psychological Association, 2004.
- [13] 刘革平, 秦渝超. 回溯智慧: 再论智慧教育的智慧性及发展之道[J]. 现代远距离教育, 2021(4): 48-58. LIU Geping, QIN Yuchao. Review the connotation of wisdom: on the wisdom and development of smart education[J]. Modern Distance Education, 2021(4): 48-58. (in Chinese)
- [14] 初景利, 段美珍. 智慧图书馆与智慧服务[J]. 图书馆建设, 2018(4): 85-95. CHU Jingli, DUAN Meizhen. Smart library and smart services[J]. Library Development, 2018(4): 85-95. (in Chinese)
- [15] 王飞, 徐旭光, 黄溪丹. 图书馆智慧服务的理论内涵及提升策略研究[J]. 高校图书馆工作, 2022(1): 49-54. WANG Fei, XU Xuguang, HUANG Yuandan. Research on theoretical connotation and promotion strategy of the library smart service[J]. Library Work in Colleges and Universities, 2022(1): 49-54. (in Chinese)
- [16] 李程, 夏丹, 董世运, 等. 复杂陆战场环境下的智能感知理论现状与发展[J]. 国防科技, 2021, 42(3): 42-48. LI Cheng, XIA Dan, DONG Shiyun, et al. Current situation and future development of intelligent perception theory in complex land battlefield environment[J]. National Defense Technology, 2021, 42(3): 42-48. (in Chinese)
- [17] 高昱. 新型人机交互技术在智慧系统的应用[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(7): 6-10. GAO Yu. Research on the application of new human-computer interaction technology in command and control system[J]. Fire Control & Command Control, 2021, 46(7): 6-10. (in Chinese)
- [18] 刘志方, 陈朝阳, 苏永强, 等. 飞机仪表显示系统的可用性评估: 眼动和绩效数据证据[J]. 航天医学与医学工程, 2018, 31(3): 341-346. LIU Zhifang, CHEN Chaoyang, SU Yongqiang, et al. Usability evaluation of instruments display format in aircraft: evidences from eye movements and performances[J]. Space Medicine and Medical Engineering, 2018, 31(3): 341-346. (in Chinese)
- [19] 王杨. 战场态势目标识别与态势意图预测的算法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015. WANG Yang. Research on battlefield target identification and situation intention forecasting[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015. (in Chinese)
- [20] 郭正玉. 美国制空作战概念和能力的新发展[J]. 航空兵器, 2023, 30(4): 10-16. GUO Zhengyu. New development of US air warfare concept and capability[J]. Aero Weaponry, 2023, 30(4): 10-16. (in Chinese)
- [21] 林榕, 杨柳, 刘娟, 等. 面向未来座舱设计的人机交互技术展望[J]. 空军航空医学, 2022, 39(3): 80-83. LIN Rong, YANG Liu, LIU Juan, et al. Prospect of human-machine interaction technology for future cockpit design[J]. Medical Journal of Air Force, 2022, 39(3): 80-83. (in Chinese)
- [22] 罗雪丰. 直升机驾驶舱智能化及关键技术研究[J]. 测控技术, 2018, 37(9): 13-17. LUO Xuefeng. Research on intelligent and key technology of helicopter cockpit[J]. Measurement & Control Technology, 2018, 37(9): 13-17. (in Chinese)
- [23] 李忠良, 刘嘉琪, 陈仁军, 等. 机载座舱显示发展趋势及关键技术[J]. 光电子技术, 2018, 38(3): 212-216. LI Zhongliang, LIU Jiaqi, CHEN Renjun, et al. Research of the developing trend and key technology of aircraft cockpit display[J]. Optoelectronic Technology, 2018, 38(3): 212-216. (in Chinese)
- [24] 刘秀峰, 吴茂平, 刘晓军. 基于虚拟现实的舰船装备虚拟训练仿真系统研究[J]. 中国水运, 2020, 20(6): 69-71. LIU Xiufeng, WU Maoping, LIU Xiaojun. Research on virtual training simulation system for ship equipment based on virtual reality[J]. China Water Transport, 2020, 20(6): 69-71. (in Chinese)
- [25] ROBLES-DE-LA-TORRE G, HAYWARD V. Force can overcome object geometry in the perception of shape through active touch[J]. Nature, 2001, 412: 445-448.
- [26] 胡晓峰, 郭圣明, 贺筱媛. 指挥信息系统的智能化挑战——“深绿”计划及AlphaGo带来的启示与思考[J]. 指挥信息系统与技术, 2016, 7(3): 1-7. HU Xiaofeng, GUO Shengming, HE Xiaoyuan. Challenges to intelligent command information system: reason and revelation on "DEEP GREEN" Plan and AlphaGo[J]. Command Information System and Technology, 2016, 7(3): 1-7. (in Chinese)
- [27] 孙柏林. 虚拟现实技术在美国军队中的应用述评[J]. 计算机仿真, 2018, 35(1): 1-7. SUN Bolin. Review of the application of virtual reality technology in American Army[J]. Computer Simulation, 2018, 35(1): 1-7. (in Chinese)
- [28] 宋志滢, 公超. 智能态势认知技术探索[C]// 第九届中国指挥控制大会. 北京: 中国指挥与控制学会, 2021: 298-302. SONG Zhiying, GONG Chao. Research on intelligent situation cognition technology[C]// The 9th China Conference on Command and Control. Beijing: Chinese Institute of Command and Control, 2021: 298-302. (in Chinese)
- [29] 熊李娜. 飞机座舱显示控制界面设计[J]. 航空工程进展, 2020, 11(3): 430-436. XIONG Lina. Interface design of aircraft cockpit display and control system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(3): 430-436. (in Chinese)
- [30] DORIGO M, FLOREANO D, GAMBARDILLA L, et al. Swarmanoid: a novel concept for the study of heterogeneous robotic swarms[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2013, 20(4): 60-71.

(编辑:丛艳娟)