基于战场时空信息一体化的战斗机智能座舱

赵丹华[1]，薛仲杰[1]，谭征宇[2]，张瑞佛[1]
（1.湖南大学 设计艺术学院，长沙 410082；2.湖南大学 重庆研究院，重庆 401121）

摘要：目的 针对未来战斗机座舱面对复杂空天地一体化信息战场环境，剖析战役级 OODA 环中重要节点及相关态势感知信息认知模型若干概念，理清其中座舱信息通道和 OODA 环流程场景下飞行员具体需求，为飞行员在空中获得一体化信息态势感知快速切入敌方 OODA 环，实施打击并取得战场优势提供指导。**方法** 从战斗机迭代发展出发，分析座舱的演变过程，探讨当下技术发展对未来座舱的信息结构和整体布局产生的影响及带来的趋势。通过文献查阅提出了飞行员在 OODA 环各作战环下态势感知信息需求。通过一体化模型整合在不同阶段和场景下的战斗机作战信息，形成座舱内作战一体化体系，并通过概念设计平衡战斗机座舱中飞行员动作需求与信息空间布局，达成初步验证和表达理论框架。**结论** 通过分析 OODA 环结合态势感知模型进行战斗机智能座舱信息系统一体化设计研究，以飞行员的战斗流程中动作需求为中心，通过一体化框架进行战斗机智能座舱设计整合了多源、多层、多量信息，构建了以飞行员在 OODA 环作战流程中作战任务动作为中心的信息一体化的战斗机座舱设计，对未来战斗机设计具有指导意义。

关键词：OODA；态势感知；战斗机智能座舱；一体化设计；场景动作；信息系统
中图分类号：TB472 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2022)14-0001-16
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.14.001

Space-time Information-based Integrated Battlefield Fighter Cockpit Design

ZHAO Dan-hua[1], *XUE Zhong-jie*[1], *TAN Zheng-yu*[2], *ZHANG Rui-fo*[1]
(1.Department of Design, Hunan University, Changsha 410082, China;
2.Research Institute of Hnu In Chongqing, Chongqing 401121, China)

ABSTRACT: In the face of the complex air-space-ground integrated battlefield environment in the future, this paper aims to analyze the important nodes in the battle-level "OODA loop" and some concepts of the related situational awareness information cognitive model have to clarify, and clarifies the specific pilot needs in the cockpit information channel and the OODA loop process scenario, provides guidance for pilots to obtain integrated information situational awareness in the air to quickly cut into the enemy's OODA loop, implement strikes and gain battlefield advantages. From the perspective of the iterative development of fighter jets, the evolution process of the cockpit is analyzed, and the impact and trends of current technological development on the information structure and overall layout of the future cockpit are discussed. Through corresponding literature review, the situational awareness information requirements of pilots in each combat loop of the OODA loop are put forward. In addition, through the integration model, the fighter combat information in different stages and scenarios is integrated to form an integrated system of combat in the cockpit, and through the conceptual design, the pilot's movement requirements and the information space layout in the fighter cockpit are balanced to achieve a preliminary verification and expression theoretical framework. In conclusion, by analyzing the OODA loop in combination with the situational awareness model, the research on the integrated design of the fighter intelligent cockpit informa-

收稿日期：2022–02–08
基金项目：国家社科艺术基金（20BG103）
作者简介：赵丹华（1982—），女，博士，教授，主要研究方向为智慧座舱与出行体验、情感设计与人因分析、设计研究范式与边界、汽车造型特征与特征线。

tion system is carried out. Placing emphasis on the pilot's action requirements in the combat process, the fighter intelligent cockpit design via the integrated framework integrates with multi-source, multi-layer and multi-amount information. Furthermore, an information-integrated fighter cockpit design centered on the pilot's combat task action in the OODA loop combat process is deisgned to serve the army, which boasts guiding significance for future fighter design.

KEY WORDS: OODA loop; situation awareness; fighter's intelligent cockpit; integrated design; scenario and actions information system

在技术发展推动下，“海陆空”天地信息一体化作战体系逐步完成。未来战斗机即将面临复杂甚至极端恶劣的战场环境，在多维立体化条件下执行多平台、多任务的高度信息化作战方式[1]。战斗机座舱是飞行员操作飞机执行作战飞行任务的核心部位[2]。未来战斗机座舱设计是以战斗机的作战流程 OODA 环（Observation，Orientation，Decision，Action）下的态势感知为核心，综合考虑飞行员在战场所处环境面临的复杂信息情况和生理心理等因素[3]，充分发挥人机系统工效的系统设计。飞行员需依靠座舱显示系统获取态势感知，随后操作战斗机内部件完成巡航、接敌、作战、打击，切入敌人 OODA 环，并破坏其核心节点，达成完成作战任务目的。未来战斗机座舱内信息一体化设计让驾驶员在战斗机智能座舱内获得全面、清晰的战场态势信息，增强视距内和超视距作战能力，形成精准操作，完成打击。

同时，“战斗机智能座舱”的设计意义，在于其潜在的时间与空间构成，即战场时空信息的一体化表达；也在于其发挥人的战斗潜力，即态势感知和动作执行效能。一方面，战场时空信息的时间与空间关系是迅速迭代的，“场景引导”和“场景预判”几乎同时发生，即时空感知（态势感知）和时空动作几乎同时发生。因此座舱设计必须符合驾驶员态势感知和时空动作的特征，提供功能完整的智能活动空间。另一方面，智能座舱其实是某种任务场景的空间容器，“作战任务”是座舱存在和座舱设计的本质。因此智能座舱设计所表达的是以人为中心，包括以我方战斗机飞行员与敌方作战人员的关系为中心的一体化战斗机座舱空间交互设计。

1 概念阐述

1.1 战斗机智能座舱和态势感知

近期的局部战争表明，在未来的高科技战场，空军的地位和作用越来越重要[4]。战斗机是主要为空对空作战而设计的固定翼军用飞机[5]。在军事冲突中，战斗机的作用是建立战场的制空权。对战场上空的控制允许轰炸机和攻击机对敌方目标进行战术和战略轰炸。

战斗机的关键性能特征不仅包括火力，还包括对于目标飞机的更高速度、灵敏性、生存能力、探测能力、飞机性能、电子战能力和武器威力等[6-7]。飞行员获得空中优势的成功或失败取决于飞行员的技能、部署战斗机的战术合理性和态势感知能力等。

人在决策的过程中，对环境信息系统的感知、推理和预测，称之为态势感知（SA）[8]，态势感知主要面向的是不确定性强、人必须介入的大型复杂动态环境或系统[9]，尤其是战斗机面临的复杂战场。可视化技术在复杂战场中，让用户能够快速理解态势感知系统[9]。因此座舱内信息可视化部分是飞行员获得信息的界面，而控制是飞行员发布指令的界面。合理的座舱布局和显控配置是影响飞行任务完成质量的重要因素之一[10]，它与提高飞行员态势感知来源、操作工效、减轻工作负荷等重要问题密切相关。

1.2 OODA 环及相关概念发展

OODA 环是对空中体系作战整体行动全过程较为清晰的描述，因当下空中作战融合多方信息、多量信息等成为复杂系统[11]。前期 Holovatch[12]提出复杂系统的特点是其许多成分之间的特定时间相关的相互作用。苏珊·贾森则提出了以人为中心的设计双循环模型，平衡了系统查询方法和以人为中心的实现方法[13]，对具体设计对象进行分析之后抽象得出层级。美国空军上校约翰·柏伊德提出的 OODA 环循环程序[14]，其中指出，作战环从观测到行动阶段作用空中作战的飞行员，由观察（Observe）–调整（Orient）–决定（Decide）–行动（Action）构成。OODA 环的核心在于根据观察信息，穿透敌军防空体系，针对敌方关键节点进行打击，破坏敌方 OODA 环循环，即约翰·柏伊德提出的穿透敌方 OODA 环，使得我方 OODA 环循环覆盖对方，从而实现穿透性制空，见图 1。

随着信息技术的发展，OODA 环 2.0 提出增强获取信息能力削弱对手。在 2.0 的基础上，随着人工智能等技术发展，OODA 环 3.0 在对应的 4 个环节中引入了智能体概念[15]，见图 2。

OODA 环 3.0 阶段飞行员将综合智能体进行判断，飞行员在座舱中的行为在战场空间和时间维度上得以进一步扩展。飞行员的交战领域在人工智能加空天信息一体化的背景下扩展到以目标为纵深，时间上的态势感知预测将由原先的“分秒制”转变为“小时制”。设计需要协同一体化，通过发现使用者的真实需求，才能保证最终的产品品质[17]。因此分析信息一体化背景下，飞行员对战斗机作战流程不同阶段的需求至关重要。在满足飞行员需求的基础上，进行座舱

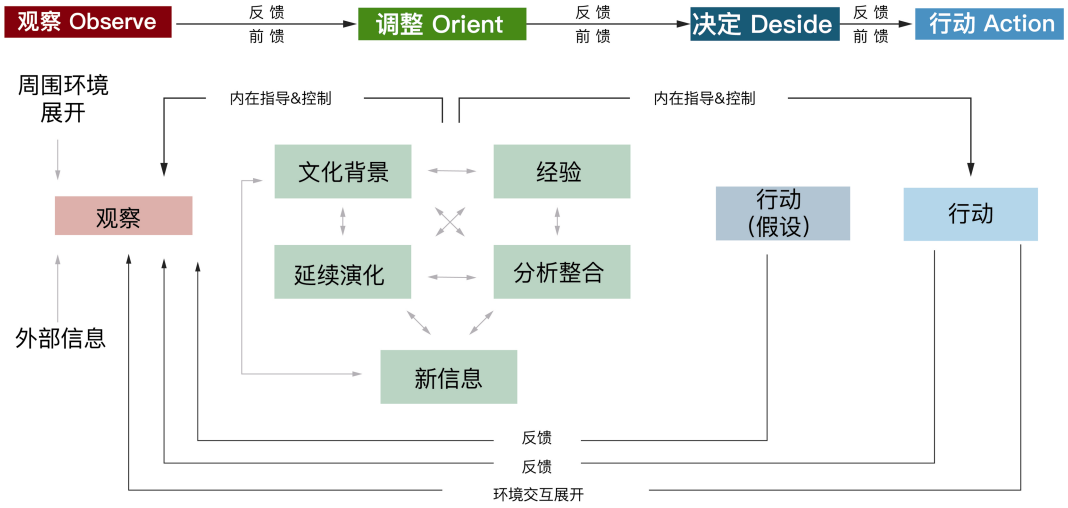

图 1　OODA 环流程[14]
Fig.1 The OODA Loop[14]

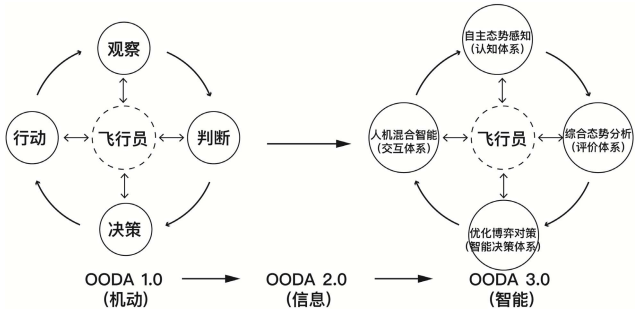

图 2　OODA 环发展[16]
Fig.2 The development of OODA loop[16]

内空间信息一体化整合，构建座舱内符合飞行员面对不同阶段的全面信息辅助内容和座舱造型设计。

1.3　态势感知和可视化回顾

从前文伯伊德所提出的“穿透性制空”作战，人们认为态势感知在 OODA 环中至关重要。作战态势认知是指挥决策的基础，也应嵌套在 OODA 环闭合回路中，并对这个回路的顺畅运行起到关键作用。在 OODA 环理论框架下，可论述作战态势认知的概念[18]。态势感知一词最初是道格拉斯飞机公司在人因工程研究期间使用的，同时开发垂直和水平态势显示，并评估下一代商用飞机的数字控制布局。它被认为是在战场情况下成功决策的关键[19]，见表 1。

表 1　态势感知时间空间意义
Tab.1 Temporal-spatial significance of situational awareness

态势感知状态	过程	结果
战术（短期）	情景评估	态势感知
战略构建（长期）	意义感知	理解
科学分析（长期）	分析	预言

Endsley 提出态势感知应用于自动化人机交互接口模型已被广泛使用，其模型表示在一定时间内，对空间内的环境元素感知，对它们的意义进行理解，以预测近未来的状态[20]。在复杂作战环境中，态势感知关注一个人对特定任务所能获取到的相关知识[21-22]。基于 Endsley 的态势感知模型，人们可以将态势感知分为 3 个层次，分别是感知（Perception）、理解（Comprehension）、预测（Prediction）三级态势感知，从对环境中信息的观察到对关键信息的解读整合，并形成对未来情况的理解。Endsley 的态势感知模型可以看作是一个标准的信息处理模型，这个模型普遍存在于认知信息学中[23-25]。三级模型的基石之一是假设环境中的特征映射到个体头脑中的心智模型[26]，并且这些模型用于开发态势感知。由经验形成的心智模型，将注意力引向环境中的关键要素，通过整合这些要素，使感知者能够理解它们的含义，然后产生未来可能的状态，被用来发展态势感知[27]。因此态势感知是一个复杂的感知与系统匹配的过程，受到了记忆力和注意力的极大影响，其中包含了短时记忆、长时记忆和感知记忆。感知记忆包含对战场环境中要素的采集，获得原始信号；短时记忆对这些信号理解并识别，标定重要性。根据 Endsley 模型，进行对未来状态的预测，需要从长时记忆提取图式（Schema），这些图式是决策者对环境综合理解和预测时所需要的各类信息和知识。在当下战场信息系统愈发复杂的前提下，决策者的决策必须由态势感知系统和自动化系统辅助了解当前环境，从而进行判断。因此根据态势感知 Endsley 所提出的基础模型结合 OODA 环，梳理出现有战斗机 OODA 环与态势感知座舱信息结构环境，见图 3。

军事背景下的态势感知被定义为“能够获得友军、敌军、中立地区和非战斗地点的准确实时信息；战场的共同、相关信息图式按照特定的兴趣和特殊需要水平进行比较”[29]。态势的可视化的软件产物就是（通用）作战态势图[30]。国外欧美军事对态势图进行了大量的探索和研究，如今战斗机中控制/信息显示技术比

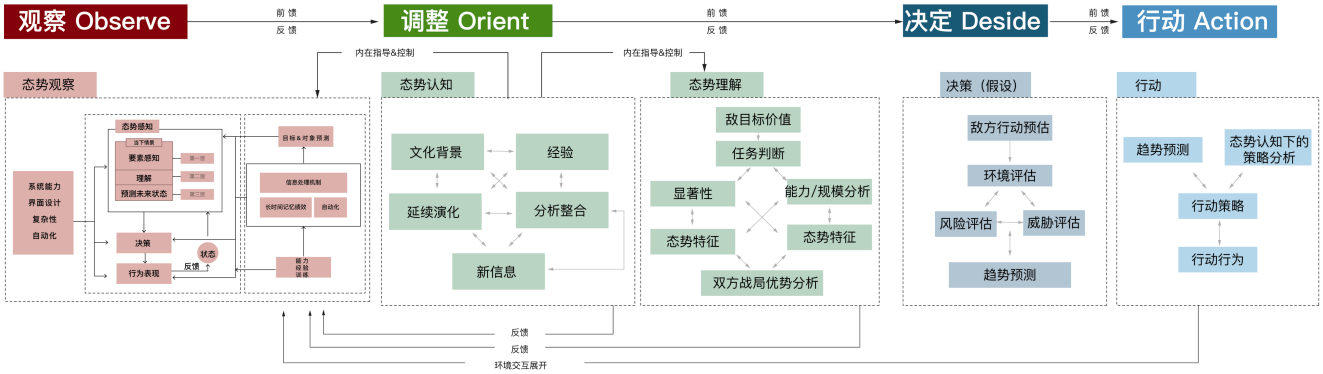

图 3 战斗机 OODA 环与态势感知座舱信息结构[28]

Fig.3 OODA loop and situational awareness cockpit information structure[28]

以往更加多样化、灵活化，允许各种各样的设计存在。航空电子传感器和处理器的发展为飞行员提供了获取更多、更准确信息的能力，并以“融合”的形式呈现出来[20]。因此智能信息可视化模块已成为各类态势感知系统的关键模块，信息可视化与态势感知具有很强的关联性[31]，它直接关联作战人员的信息获取与储存方式，对未来战场内作战人员的判断将有较大影响，而信息可视化与态势感知的关联，见图 4。

1）信息可视化是飞行员有效态势感知来源。视觉感知可获取的信息量和信息密度相对较大，其他交互通道可作为有效辅助，信息可视化为飞行员 OODA 环中态势感知过程提供支持。

2）信息可视化增强态势感知能力。飞行员利用可视化视图进行态势感知，易于识别和理解复杂战场环境中的要素，使态势感知能力得到增强。

3）信息可视化支持态势感知的各个层次可视化（可以支持感知层、理解层、预测层）。

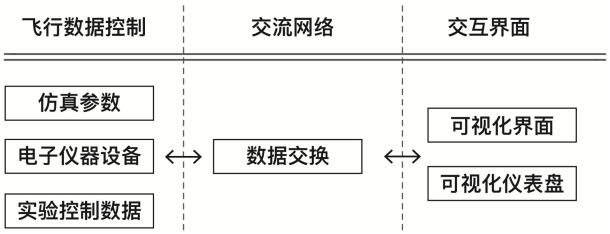

图 4 现有飞机座舱态势感知与信息结构环境[28]

Fig.4 Current aircraft cockpit situational awareness and information structure environment[28]

1.4 战斗机座舱中信息可视化的发展分析

战斗机座舱的发展无需追溯到莱特兄弟，作为世界上第一架飞机，它尚未形成完整的飞机座舱概念[32]。自第一架战斗机 Voisin III 于第一次世界大战问世以来[33]，战斗机座舱跟随战斗机的性能推进发展，逐步进入智能化。1990 年航空历史学家 Hallion[34]主张将战斗机的发展划分为 6 代，而按照一般国际标准将自二战之后出现的喷气式战斗机发展划分为了 5 个阶段，目前我国将战斗机的发展分为了 4 代[35]，见表 2。

表 2 战斗机发展迭代

Tab.2 Fighter aircraft's development

发展迭代	国际标准		国内标准	
	年份	代表作	年份	代表作
第 1 代	1945—1955	F–86	1950—1960	歼 5、歼 6
第 2 代	1955—1960	F–104、F–105	1970—1980	歼 7、歼 8
第 3 代	1960—1970	F–4	1990—2000	歼 10、歼 11
第 4 代	1970—1990	F–15、F–16	2010—至今	歼 20
第 5 代	约 1990—至今	F–22、F35		

随着信息时代的到来，战场环境正在形成天地一体化大测绘的概念。这个信息化的大测绘是利用“海陆空”天地一体化的导航定位和遥测、遥感等空间数据获取手段来自动化、智能化和实时化地将信息随时随地提供给每个人，服务到每件事，战斗机的海陆空信息一体化通过天地一体化网络实现[36]。该网络以地面网络为基础、以空间网络为延伸，覆盖太空、空中、陆地、海洋等自然空间，为天基、空基、陆基、海基等各类用户的活动提供信息保障的基础设施[37]。Buzan[38]同样指出基于空间信息一体化技术，让各国之间能够精细观察彼此，获得大量战场信息。战斗机座舱内部通过技术融合，整合地空一体化信息并实时传输至战斗机。战斗机作战飞行人员通过传输信息获得战场环境，形成态势感知，见图 5。

文中梳理了战斗机座舱的演变与发展（见表 3），分析了随着技术的发展和在军事上的应用与未来战场环境逐步转向天地信息一体化，对未来空中作战 OODA 环特征发展的影响，初步总结得出未来智能座舱中 OODA 环和态势感知信息结构的特点，座舱中人机交互的发展趋势与未来战斗机中飞行员面临的信息需求总结，期望为未来空战的座舱设计提供借鉴和设计指导。

科学技术的进步和系统综合水平的提高是推进座舱设计水平提升的关键力量。从第 1 代显示仪表至

第 4 代显示仪表，每代显示仪表的运用都使座舱仪表板简洁化，同时促使工程师设计出相匹配的仪表布置原则，减轻飞行员的视觉负担。系统综合水平的提高使得座舱内各系统的开关可以相互综合，如几个连贯的操作动作，飞行员只需完成第 1 个，后续几个由计算机自动控制完成。此外，结合多功能显示器，变“硬开关”为“软开关”，战斗机飞行员可直接在显示器上完成操作。

战斗机座舱的设计越来越强调人机工效，强调将飞行员与座舱及其环境的相互关系、协调性和人性化联系起来综合设计，使座舱任务作业更能够与飞行员相适应，而不是要求飞行员适应座舱内部硬件及其环境，从而减轻飞行员的负担，让不同飞行员可以舒适地操纵飞机，提高工作效率和安全性。第 1 代和第 2 代战斗机的设计是为了最大限度地提高飞机的性能（例如速度、射程、有效载荷能力、机动性等），而

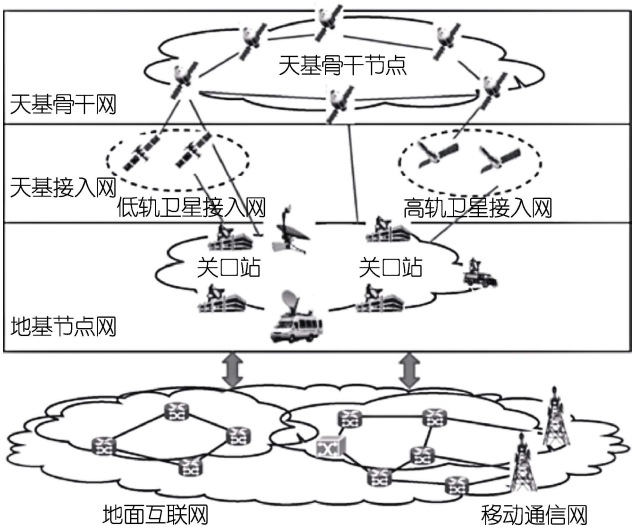

图 5　天地信息一体化示意图[39]
Fig.5 Space-Air-Ground Integrated[39]

表 3　战斗机座舱 OODA 环和态势感知信息可视化迭代发展对照
Tab.3 The development of OODA and situational awareness' information visualization in cockpit

战斗机迭代	年份	应对环境	OODA 特点	态势感知信息结构特点	代表机型
第 1 代	1945—1955	空中战场	**O**：通过“Basic Six”模式仪表盘主要包含了空速、人工地平、高度计、转弯和坡度指示器、航向指示器、垂直速度。了解战场环境。飞行中的飞行员通常使用一个假想的“T”也称为“Basic T”[40]来解释他们的相对位置。 **O**：通过个人感知对战场情况进行调整。 **D**：依靠飞行员个人经验判断进行决策。 **A**：简易的机械结构为主，飞行员手动瞄准，实施打击。	飞行员需要充分了解所有仪表盘的特性和局限性，以提升反应速度和机械操作的协调，作战过程中极大地增大了飞行员识别目标和实施打击的工作负荷	Heinkel He 162（德）、Gloster Meteror（英）、F86（美）、歼-5（中）
第 2 代	1960—1966	空对地-地对空战场环境	**O**：在原有的基础上进行了信息整合，增加了仪表盘数量和信息密度，对信息排布进行了重新布列；飞行员可通过雷达信息了解部分空中情况[41] **O**：通过个人感知对战场情况进行调整。 **D**：依靠飞行员个人经验判断进行决策。 **A**：内部的可操作电传操作控件数量大幅度提升；飞行员可通过机械操作导弹进行攻击。	维持了第 1 代的独立显示仪表和机械连杆操作为主的布置。仪表盘和座舱内操作按键或拨盘爆炸式增量，分散排布，座舱内的 T 形布局成为基本排布。舱内信息增量，繁多复杂，飞行员认知负荷增加	F104（美）、MiG–21（苏联）、Mirage III（法）、歼-7（中）、歼-8（中）
第 3 代	1960—1970	全天候战场复杂环境	**O**：座舱配置阴极射线管电子显示器（单色）显示仪表开始出现灵活化–分时显示。 **O**：信息整合辅助进行态势感知调整。 **D**：依靠飞行员个人经验判断进行决策。 **A**：传统控件已被多功能可重新配置控件或所谓的“软键”所取代[42]。使用 HOTAS[43]核心控制配置，即所有的开关集成于操作杆和油门上[44]。	座舱信息向复杂系统发展，开始出现初步座舱信息整合分层，信息层级增加。	Phantom F–4（美）；MIG–23（苏联）；Mirage F-1（法）

续表 1

战斗机迭代	年份	应对环境	OODA 特点	态势感知信息结构特点	代表机型
第 5 代	1999—至今	天地信息一体化战场环境	**O**：在第 4 代玻璃座舱基础上融合飞行员头盔显示器[45]辅助飞行员增强态势感知和获得全息大视角场景[46-47] **O**：多通道交互在座舱中提高了更直观的信息感知调整方式[48-50] **D**：地空协同决策，智能体辅助决策 **A**：多机协同，飞行员打击操作更加灵活形成 HMD 视觉跟踪[46,51-52]，HOAST、手势交互[53-55]或触摸屏[56]形成直接打击[57-59]，地空导弹协同作战，有效解决认知负荷[60]，形成“马赛克”式空中网络打击，提升了整体作战机能[61]	战斗机座舱兼容多维度显示和多维度操作，飞行员可通过座舱系统多通道感知战场情况并进行反馈操作。座舱智能信息系统辅助驾驶员进行战场态势感知，座舱信息来源多样化，多方辅助感知战场信息并进行决策，多代理和智能体共同参与进行打击决策	Su–35（苏）；F–35（美）；Dassault Rafale（法）；Saab JAS 39 Gripen（瑞典）

第 3 代战斗机的性能则因任务和航空电子系统的进步（例如隐形、监视、武器等）而得到提高。第 3 代战斗机采用了精确制导的弹药系统，支持向视觉以外的交战过渡。在向第 4 代战斗机过渡的过程中，取得了一定的进展，使战斗机和多用途战斗机能够发挥空对空或空对地作用，或进行空中侦察、监视和支援。目前，第 5 代战斗机正在开发中，以支持网络中心战。第 5 代战斗机的特点是具有与其他飞机联网的固有能力，并通过智能数据融合算法管理大量数据，从而增强了战斗机飞行员在日益复杂情况下的情势察觉和战术决策能力。通过分析可见，从第 1 代到第 5 代，飞行员在空中作战的OODA环循环观测区域和行动区域形态在不断变化，战斗机的座舱显示与控制（显控）系统是飞行员和飞机之间传递信息的界面，由显示和控制 2 部分组成，见图 6。从第 1 代的观测和行动区域机械式分离，到第 5 代的信息融合，形成分布式态势感知，空间扩展。未来作战在座舱内的飞行员的感知能力和范围大大增强，作战行动能力也更加自主灵活。

1.5 战斗机智能交互方式的发展

1）座舱显示系统物理重构–PCCADS（Panoramic Cockpit Control and Display System）。随着态势信息变得越来越复杂，有限的 2D 显示可能不足以以容易理解的方式呈现飞行员的关键信息。大面积全景显示器与立体 3D 分离技术相结合[62]，为飞行员提供了远优于现有技术的态势信息。四维全景显示屏能够在同一窗口中集中显示[63]飞行空中地图、地面的作战地形、座舱状态、作战目标，包含时间和空间关系的 4D 飞行轨迹[64]等内容，同时还能分屏显示飞行数字地图、全景地图、系统状态及飞机各个飞行阶段的相关信息等。四维全景显示技术的应用，能够提高飞行员的感知力，当下飞行员座舱显示屏幕可辅助合成打击功能路径信息和地形图像[65]，帮助飞行员进行未来飞行轨迹及飞行信息的预测。

2）飞行员–战斗机多智能体与自动化。在技术不断发展的背景下，战场上航行追踪效率和打击效率仍然有限，因此提出了下一代智能航空交通系统（SATS）[66]，即飞行员通过网络链接和座舱内智能体和空中交通管制员进行沟通，飞机座舱内的智能体和地面交通管理员将根据战场情况，辅助飞行员进行下一步动作判断，支持执行和协调他们的活动。人–智能体之间的交互设计符合交互设计研究的共性[67]。因此未来战斗机座舱中将存在多智能体，飞行员与座舱中的智能体以及地面协管员形成“协同关系”，他们辅助飞行员与机载设备相互适应，协同完成飞行打击任务。其次是意图推进器，可综合任务计划内容和机载系统当前状态推断飞行员下一步操作。最后是综合自动化，可给予机器适度权限，在减轻飞行员操作强度的同时保证决策的可靠性。

图 6 随 OODA 环发展座舱中观察行动区域变化[16]
Fig.6 The development of OODA loop In Cockpit[16]

2　一体化座舱信息系统设计

2.1　座舱信息系统设计

战场环境巨大且复杂，当下作战可视化环境（The Joint Operations Visualization Environment）是面向战术决策支持系统的可视化软件产物。针对信息系统设计已经具有一定的研究基础。针对国内外信息系统设计研究综述，见表 4。

表 4　信息系统设计研究综述
Tab.4 Information system design review

参考案例	时间	应用场景	技术特点
Boland 等[68]	1978	信息系统设计过程	解决了用户如何参与系统设计过程问题，通过信息系统设计比较了系统设计师和用户的不同交互过程。不同的交互过程有助于定义不同的问题，同时有利于提出不同但合理的解决方案
Gerlach 等[69]	1991	信息系统	根据应当以用户为中心的理念，提出信息设计系统模型，其中分为 3 个部分，即系统模型、动作语言和表示语言。系统模型是系统对象和功能的概念描述。基本前提是选择一个好的系统模型为设计决定系统外观和感觉的动作和表示语言提供方向
Baskerville[70]	1993	系统设计	针对信息安全提出了框架，使用控制清单、将功能需求划分为工程分区及创建问题和解决方案的抽象模型的方法
Sarter 等[[71]	1995	人机协作	探讨人机协作出现的问题，探索了对空中“强大而沉默”的代理影响，并得出结论，飞行员有可能无法观察到和干扰非指令的自动化飞机代理行为
姚莉等[72]	2001	信息系统设计	提出一种将组织学与多智能主体技术相结合建造复杂信息系统的开发方法。该方法的基本思想是首先将复杂信息系统看成一个多主体组织，依据组织学原理分析多主体系统组织特性，建立多主体组织模型，从而形成多主体系统宏观结构和功能需求的严格规范
魏洪涛等[73]	2002	信息系统设计	在数据访问控制方面采用了基于角色的安全策略，设计了数据访问控制的逻辑模型和基本方法。在 Web 访问控制方面，利用了 NET 的 Forms 认证方式，把二者整合形成一个完整的安全模型
Gregor[74]	2006	信息系统设计	提出了根据解决 4 个中心目标的方式对信息系统进行分类，即分析、解释、预测和规定。区分了 5 种相互关联的理论类型，分析理论、解释理论、预测理论、解释和预测理论，以及设计和行动理论
Allen 等[75]	2006	信息系统设计	IT 系统应该包含基于组织及其环境的多代理表示的建模功能，以探索和支持战略思维和决策制定。基于代理的价值论框架对理解组织的演变至关重要，正是代理之间的交互作用就组织的共享现实建立了共识
Filip[76]	2008	复杂系统决策	过去分层方法一直是控制大规模系统最常用的方法之一，近年来已经向更多的协作方案发展，当需要人工干预时，决策支持系统（DSS）可以代表一个解决方案。DSS 是一种适应性和不断发展的信息系统，旨在实现人类支持团队的多项功能
Torning 等[77]	2009	系统设计	旨在行为的改变而不是态度的改变，而追踪（Tailoring）、隧道（Tunneling）、减少（Reduce）和社会比较（Social comparison）是研究最多的系统整合论述方法
Tanriverdi 等[78]	2010	信息系统	构建了信息系统（IS）战略研究的 3 个主要任务，战略一致性任务、集成任务和持续竞争优势任务
卞婷等[79]	2010	信息系统设计	将生态界面设计理论应用于飞机座舱人机界面设计之中，整合形成生态人机飞机座舱界面设计
王苗辉	2011	信息系统设计	以用户注意、人机交互的方式和具体过程对用户能否准确、迅速认知产品的视觉信息界面有着重要影响为启示，为提高用户对产品的注意以及人机交互的效率，即改善用户对产品的认知，从产品视觉信息界面中视觉元素的分组和布局、视觉元素的属性，以及视觉元素含义的理解 3 个方面入手进行了具体的设计

续表 2

参考案例	时间	应用场景	技术特点
赵欣等[81]	2018	信息系统设计	通过可用性评估指导复杂信息系统界面设计改良，降低系统复杂性带给用户的工作认知负荷，提高用户绩效成为亟待解决的问题。针对复杂信息系统界面进行了研究，从界面特征、任务特征、认知特征进行了分析，提出了界面复杂性的影响因素，构建了复杂度评估指标体系，采用层次分析法针对界面的复杂性的指标权重进行了研究，并根据构建的复杂度模型提出了相应的可用性指标体系
Zmud[82]	2022	复杂系统决策	针对组织结构和活动分析后进行了原型设计，提出了新组织形式信息对管理者的影响，协同研究人员和管理人员需承担任务，主张最终向用户主导更多信息系统活动过度

2.2 目前面临的问题与需求

2.2.1 目前面临的问题

1）多任务处理。战斗机座舱通过天地信息一体化智能网联等信息感知方式让战斗机座舱内的飞行员态势感知范围更广，响应速度更快，以达成同时发生的多任务形成，然而未来战场面临多平台、多任务、复杂信息集合的特点，飞行员面对嘈杂、暴力、混乱的空战领域，可能同时需要处理来自眼睛和耳朵的信息，并同步控制世界上最复杂、需要最快响应的机器。因此空中作战的多任务处理仍然是一个重大挑战。当下针对多任务处理的挑战并行提出，精神学家 Meyer 提出人类无法完成多任务处理[83]，飞行员可通过训练，切实努力突破自身并完成多任务空中作战操作处理。当下天地信息一体化背景下信息复杂度提高，多任务同步处理难度提升，同步多任务处理对飞行员仍是重大挑战。

2）多层级。信息分布于多层级结构上应用，拥有机构清晰、配置灵活可跨平台等优点[84]。在数据总量增加、种类增多、不断扩张的基础上，飞机座舱内设备和其他连接到互联网的设备传感器的增加，辅助战场态势感知数据生成和增长的速度正在加快。舱内同时采用云服务来存储、处理和分析数据，因此针对座舱内信息显示和处理的层级也会不断增加。

3）信息爆炸。一体化信息集成至座舱后，座舱内信息更加复杂，通过信息一体化飞行员可感知一定时间和环境要素，提升态势感知整体能力。但战场一体化信息数据体量庞大，信息数量增加，信息来源复杂、模态多样。在作战过程中飞行员需要迅速接收信息并对信息做出反应。在空中作战状态瞬息变化，由于信息来源的噪音、缺失、不一致等造成信息来源的不确定性，飞行员识别信息的过程和操作复杂度提升。现有的战斗机布局已不能适配未来战场。

4）多智能体下的协同信任。飞行员与自动化交互的主要问题之一是缺乏模式意识[85]（即自动化当前和未来的状态和行为），当自动化采取意外行动或未能按预期运行时，飞行员有时会遇到所谓的自动化意外。缺乏模式意识和自动化意外可以被视为人与机器的属性和能力不匹配的症状。

当下战斗机座舱中面临的主要问题仍然是信息来源。多层、多样化、来源多方的信息造成飞行员认知负荷。战场信息由多方判定，飞行员需要快速反应，针对战场信息做出反馈，操作形成精准打击，而随着技术的发展，未来智能座舱的信息维度将进一步提升，在下一步的设计中，战斗机智能座舱的信息整合仍是重中之重。

2.2.2 飞行员需求分析

飞行员需要进行飞行操控，在战场中进行必要的机动操作。飞行员的迫切要求是能以简单易懂的方式自动实时地显示所需要的信息[16]。通过文献调研得知，战斗机飞行员需要显示信息简单直观，友好且协调有序以应对复杂多变的战场环境和瞬息万变的战斗状态。现代空战包含视距内和超视距作战，拥有超视距作战能力将在空中具有更高获胜率[86]。在原有 5 代战机（中国 4 代机）“Super Maneuverability”（超机动性）、“Super Sonic Cruise”（超音速巡航）、“Stealth”（隐身）、“Superior Avionics for Battle Awareness and Effectiveness”（高可维护性和超视距打击）的基础上进行进一步升级。超视距作战[87]带来的变化能够减少超机动动作的需求，因此更多的时候处于远距离信息作战的操作中。未来多频段高隐身作战也需要飞行员能在驾舱中获取更明确的敌我识别信息[88]。具备超视距感知和作战能力，可提前对超视距空域进行探测和空域目标进行分析、监视等工作，联合操作形成超视距打击。由于未来战斗机武器性能提高，可联合无人作战平台进行协同作战。因此需要飞行员进行战场态势评估，对僚机（无人作战武器）进行指挥工作[89]。同时需要联合空、地等指挥单位执行超视距的打击任务。未来战斗机的部分任务会被智能化系统替代，但是由于战场环境复杂，可能出现自主化系统失效或者无法应对特殊情况等情形，因此需要飞行员与自主化系统进行人机协同操作，必要时对系统进行接管等动作，见图 7。

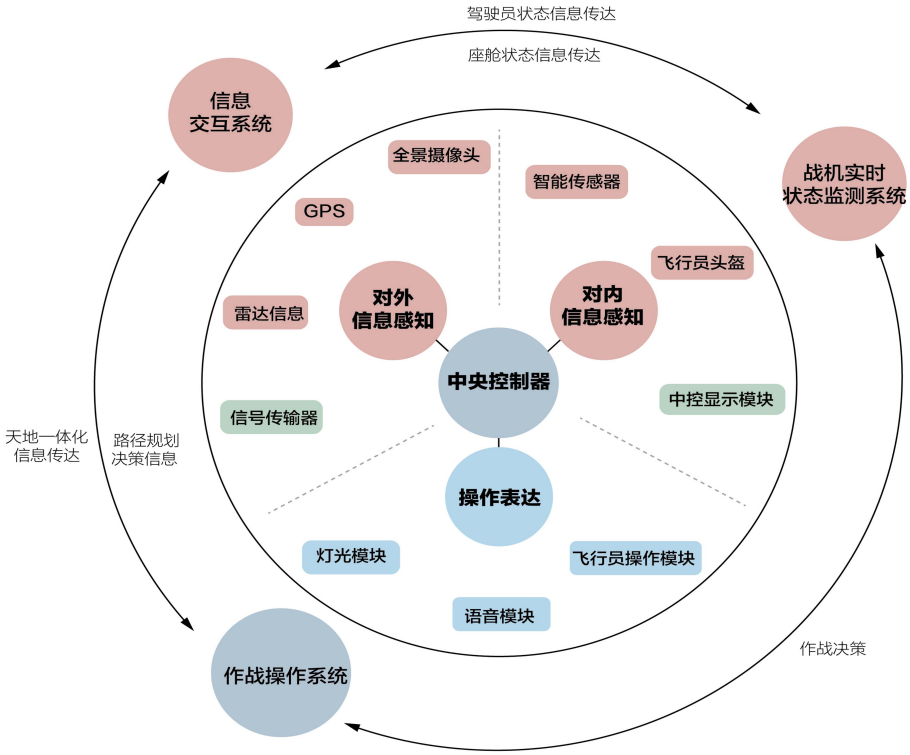

图 7　智能战斗机座舱中信息和功能要素分析

Fig.7 Analysis of information and functional elements in intelligent fighter cockpits

2.3　战斗机座舱信息一体化设计

一体化设计是一种综合整体的设计方法，汇集了通常单独考虑的专业。它试图考虑决策过程所需的所有因素和调节[90]。Stevens 等[91]指出一体化设计的出现主要有 3 个原因，其中之一即部分的信息分散，一体化设计可协助整体的协调以实现其信息协同的潜力[92]。建筑师赫尔佐格同样提出一体化设计在于通过科学的设计方法，整合多个学科的最新科学知识，并将之体现在最终的设计或者设计概念的发展中[93]。一体化设计体现在不同设计领域中，比如建筑物的整体建筑设计[94]，其中包括建筑学、结构工程和建筑与可持续发展设计等。该方法也可以整合建筑生命周期管理与建筑物最终用户的更多考虑[95]。在产品设计方面，一体化设计主张作用于产品设计的创意过程和产品生产过程中，以及整合资源等系统[96-97]。当不同的专业相互依赖或“耦合”时，就需要进行一体化设计。

2.4　信息一体化（框架）设计和以人为本的理念

战斗机智能座舱在多技术融合、大数据支持的态势感知基础上，应当了解整体战场环境的态势感知、一体化天地信息和地面协同信息，辅助飞行员通过传感器捕捉到的外界信息，了解机载状态和战场情况，围绕作战任务展开行动。杨建民提出，当下军事信息系统研究设计，应当综合考虑开发环境、参与者、需求和设计流程[98]。结合 OODA 环下对态势感知，人们认为作战飞行员于空中战场应当了解座舱内的具体信息，并通过座舱信息系统理解战场情况，扩展战场感知视野，及时进行调整并针对实时信息进行反馈行动。同时座舱能够监测飞行员状态，并通过智能体进行交互，给出建议，辅助飞行员实施最终的打击任务，整体围绕战场信息、飞行员和战斗机座舱，针对 OODA 环中的从观察、调整到决定行动，进行了信息整合的一体化框架设计，见图 8。

3　面向信息一体化的智能战斗机座舱设计

座舱中的 3 个重要方面分别是外界战场关键感知，内部座舱感知及操作。在一体化的视角下，分析具体设计中具体功能和信息要素，形成整合图鉴（见图 8），并在流程设计方面，对每个信息的相关环节进行分析，发现其中问题，通过一体化理念进行调节整合分析。战斗机座舱是飞行员在空中进行巡航、作战等操作的核心区域，座舱设计体现了战斗机的综合技术水平，也在一定程度上反映出它的作战能力。战斗机座舱设计是一项以飞机的作战任务，战术技术性能和结构设计为依据，充分考虑人的生理、心理诸因素，以充分发挥人–机系统工效的系统工程。2021 年以“未来”“科技”与“人因”为主题的首届未来座舱创新设计大赛，“X–Fighting 面向信息一体化的智能座舱设计”探讨了面向未来空中战场 OODA 环循环中新态势感知下的座舱设计研究。

驾驶员对内饰造型的感知首先来自空间感知，其次是形态特征[99]。针对此次战斗机座舱设计，考虑侧

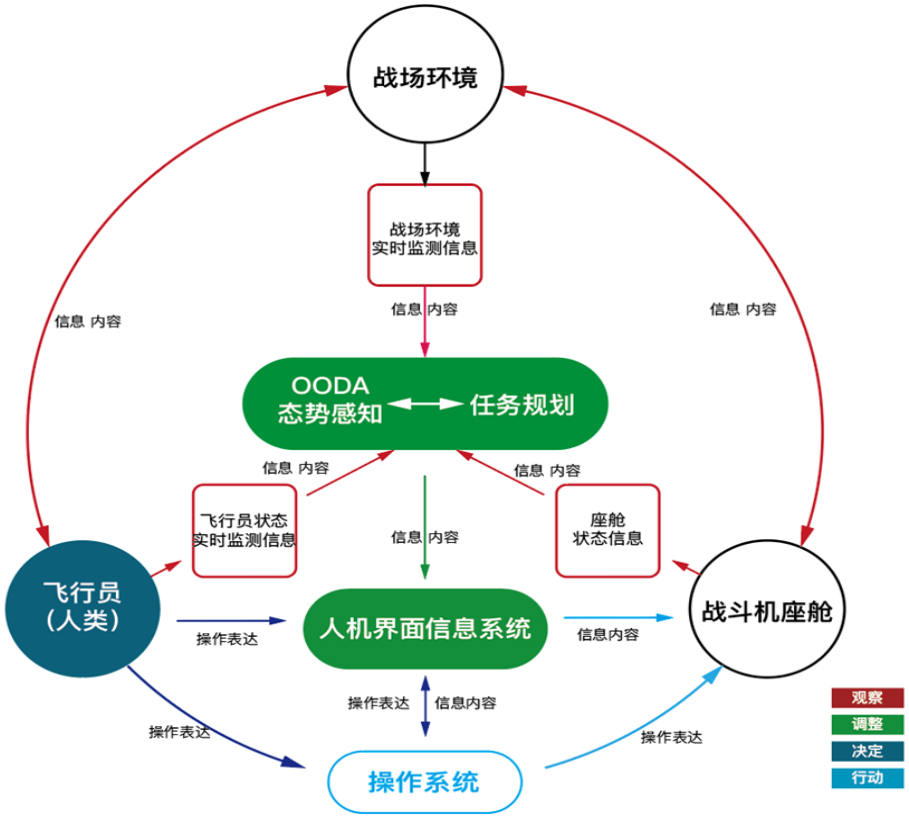

图 8 基于信息一体化未来智能战斗机座舱设计框架

Fig.8 Design framework for future intelligent fighter cockpits based on information integration

重座舱内单人驾驶战斗机的场景，孙海洋等提出基于场景的设计由一种思维模式发展为一种有组织的方式[100]，而场景一词由戏剧延伸而来，代表：“在一段时间内，空间中所发生的叙事性动作行为构成的场景画面”。因此在单人面对多任务与复杂信息处理的场景下，对座舱内可视化区域和内部的空间元素进行一体化整合，平衡战斗机飞行员的 OODA 环下针对态势感知反馈的动作、行为和战斗机座舱空间中布局，以达成驾驶战斗机和打击目标二者任务的平衡条件下实现精准打击目标。其中对于信息获取阶段，基于信息一体化设计框架中红色部分所提出的交互信息一体化设计，与传统显示方式的区别在于将不再局限于单一的物理设备，而是多位置、多显示形式、多通道的整合（见图 8），将传统的物理仪表盘整合成为一体的环绕式曲面屏幕（见图 9–01），根据战场信息、指挥部信息，以及根据不同飞行员动作习惯，进行个性化设置等层级进行分解分级，对信息分布、不同显示区域的信息传递、不同信息维度的可视化等维度进行设计。飞行员可以在视线不离开前方路面的前提下，获得各类信息，有效地提高驾驶的安全性，获得更加直接的操作动作。平视显示系统将导航、空中情况、自身情况等数据，可视化处理到前方屏幕中的位置，帮助驾驶员获取驾驶信息、辅助驾驶信息和打击目标获取与分级，并且平视显示提升驾驶安全，降低驾驶员认知负荷的优点，使其具有更大的战场场景和环境空间观测区域（见图 9–02）。在未来飞机座舱内或将面临庞大的多样化信息，而搭载平视显示的环绕屏幕也可根据不同信息进行界面的重新整合与分级。

在交互形式上，见图 8 所示框架中从决定到行动部分，整体概念设计基于战斗机飞行员从态势感知到决策动作的瞬时触发性考虑，利用眼动锁定敌机，快速通过驾驶员语音交互决策，下方柔性屏幕快速切换为物理按键屏幕用以适应飞行员的快速打击行为，自动化适应并完成一系列操作。见图 9–03 中，通过虚拟 AR 战斗平台规划最佳追踪路径并锁定了敌机对象之后，交互信息系统（见图 9–04）将在玻璃罩舱及 AR 中显示对敌机方位的锁定，此时空中信息与飞行员的实时交互为整体背景，飞行员根据规划路径进行决策追踪并直接利用语音交互下达对此目标的操作准备命令，如“发射导弹”“雷达锁定”等指令，通过可变形触摸屏幕上的按钮进行攻击。触摸技术提供了许多优势[56]（触摸屏提供更加直观的操作可进行直接操作，更容易形成手眼协调），有助于保持飞行员的注意力向上和向前，以实现更安全和更有效的飞行[101]。

为解决未来遇到在视距和超视距作战中，对空中信息的判断不准确造成无效打击或误伤队友的情况，X–Fighting 智能座舱中将根据图 8 框架中提出的对战场信息进行天地信息一体化协同，实时监测导出显示在作战交互系统终端屏幕（见图 10）实现远程信息与终端参与辅助判断，进行飞行中的任务判断辅

图 9　X–Fighting 面向信息一体化作战的智能座舱
Fig.9 X-Fighting's intelligent cockpit for integrated information combat

图 10　X–Fighting 作战交互系统
Fig.10X-Fighting's information system

助，达成明确的敌我判断，并针对敌方目标进行分级判断，排列优先打击对象层级。

座舱系统设计需以驾驶员为中心，驾驶员作为座舱的使用者和决策的最终决定者，只有在座舱系统设计的全流程中关注飞行员在 OODA 环中不同环节中需求，才能保证座舱系统设计结果的有效性，并体现其最终价值。战斗机作战流程根据 OODA 环模型可大致细分为巡航、目标识别、超视距打击、视距内打击、组织战斗协同、效果评估等 6 个阶段，见图 12。

1）巡航阶段。根据天地一体化信息，综合使用各类情报信息，一体化整合为统一态势信息。飞行员通过座舱内的环绕屏显示系统直观地查看战场空域

对象情况，包括友方战机位置及部署，敌机数量、空域位置和战机战力信息等。

2）目标识别阶段。针对天地一体化信息对目标性质加以判别识别，确定战场态势信息，飞行员通过座舱全息显示系统查看整个三维战场物理域信息，开始协同作战部署和指挥，向友机发送作战指令，包括友机需到达位置，以及动作路线。

3）超视距打击阶段。指挥控制协同作战武器平台或由自身携带的远距空对空导弹发起攻击，同时通过座舱内全息显示系统查看导弹的飞行位置。

4）进入视距内攻击阶段。系统完成超视距范围的打击之后，遭遇同等优势战机的视距内侵入。此时，飞行员切换目视距离战斗模式，座舱内显示屏（下视显示器）变换为物理操作按键，飞行员对其进行功能自定义，并在近距离空战中快捷操作实现战术动作。进入缠斗阶段，飞行员利用舱盖全景显示器标定和凸显敌机位置（见图 11），在智能作战系统导引下寻找导弹发射位置，最终击落敌机。

5）打击效果评估阶段。综合使用各种探测器材和情报信息，评估打击效果，必要时组织兵力抵近观察、判别，综合运用各种手段，评估前期打击效果，视情况组织兵力实施补充打击。

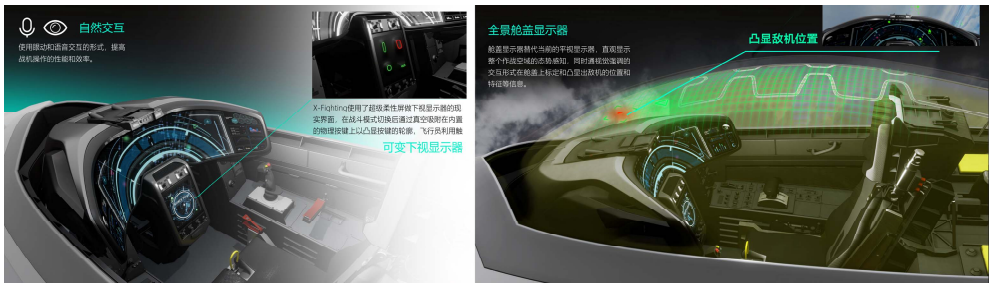

图 11 X–Fighting 智能座舱

Fig.11X-Fighting's intelligent cockpit

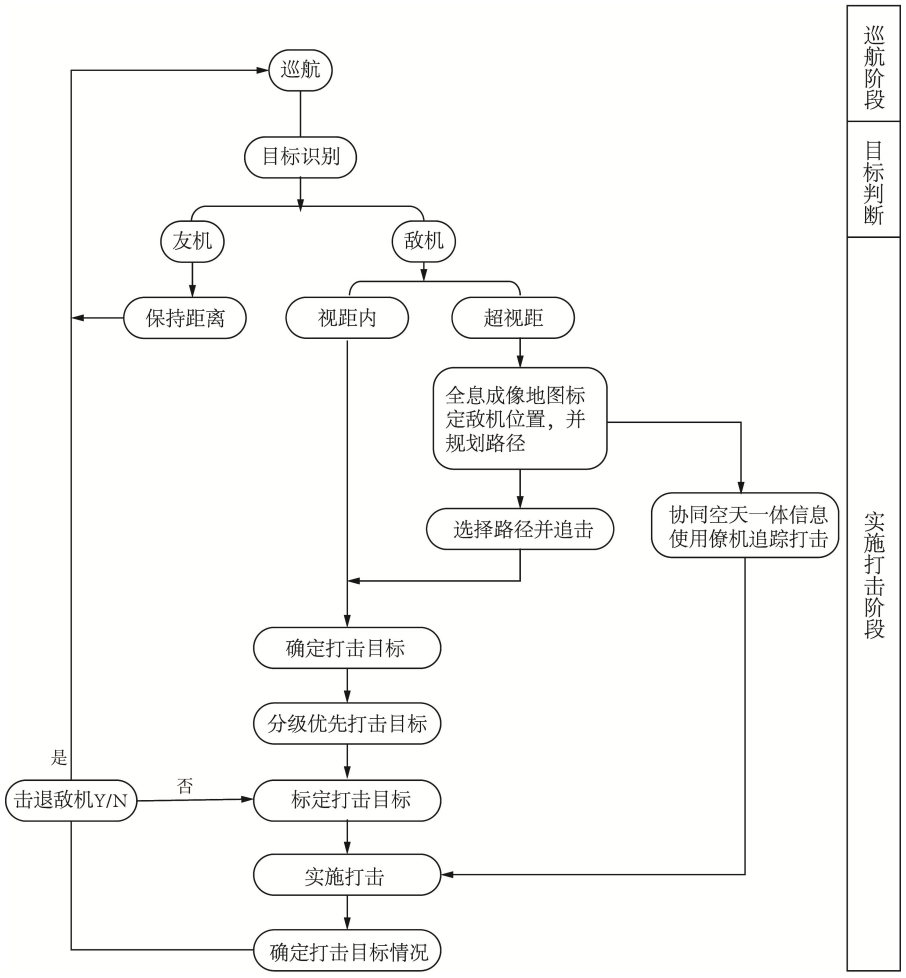

图 12 X-Fighting 智能战斗机作战流程

Fig.12 X-Fighting Intelligent fighter combat flow

4　结语

针对未来技术不断发展的复杂天地信息一体化战场背景下，对战役级 OODA 环下的作战态势认知与相关信息可视化进行了探讨。厘清了 OODA 环框架下作战人员的作战态势认知信息需求，梳理了一体化信息设计下战斗机飞行员在作战流程场景中的动作需求。提出了一体化信息系统设计理念，并建立概念模型。根据模型进行了座舱内信息布局和空间设计，平衡空间关系与战斗机飞行员不同阶段动作需求。达成快速感知瞬时打击敌方动作实现，为在未来空战中提前切入敌方 OODA 环夺取战场先机提供设计指导。

参考文献：

[1] 孔渊，陆虎敏．未来战斗机座舱显控系统发展动态[J]．航空电子技术, 2006, 37(3): 33-37.
KONG Yuan, LU Hu-min. Development Trends of the Cockpit Display and Control System of Future Fighters[J]. Avionics Technology, 2006, 37(3): 33-37.

[2] 张宁．战斗机座舱布局的变革[J]．现代军事，2003(12): 36-38.
ZHANG Ning. Change of Fighter Cockpit Layout[J]. Conmilit, 2003(12): 36-38.

[3] 孙鹏，宋华淼，苗丹民，等．高性能战斗机飞行员心理健康状况及个性特点分析[J]．第四军医大学学报，2006(4): 373.
SUN Peng, SONG Hua-miao, MIAO Dan-min, et al. Analysis of Mental Health Status and Personality in Third Generation Battle Pilots[J]. Journal of the Fourth Military Medical University, 2006(4): 373.

[4] 汪民乐，高晓光，蔡付东．作战飞机效能分析研究综述[J]．飞行力学, 2001, 19(4): 1-5.
WANG Min-le, GAO Xiao-guang, CAI Fu-dong. Overview of Research on Military Aircraft Combat Effectiveness Analysis[J]. Flight Dynamics, 2001, 19(4): 1-5.

[5] Merriam-Webster. Fighter Definition & Meaning [EB/OL]. (2019-05-16)[2021-11-05]. https://www.merriam-webster.com/dictionary/fighter.

[6] 郭辉，徐浩军，张彤，等．飞机作战效能的灵敏度分析[J]．飞行力学, 2009, 27(2): 31-33.
GUO Hui, XU Hao-jun, ZHANG Tong, et al. Sensitivity Analysis for Combat Effectiveness of Aircraft[J]. Flight Dynamics, 2009, 27(2): 31-33.

[7] 王锐，张安，史兆伟．基于幂指数法和 AHP 的先进战斗机效能评估[J]．火力与指挥控制，2008，33(11): 73-76.
WANG Rui, ZHANG An, SHI Zhao-wei. Effectiveness Evaluation of Advanced Fighter Plane Based on Power Series and Fuzzy AHP[J]. Fire Control and Command Control, 2008, 33(11): 73-76.

[8] 章坚民，陈昊，陈建，等．智能电网态势图建模及态势感知可视化的概念设计[J]．电力系统自动化，2014, 38(9): 168-176.
ZHANG Jian-min, CHEN Hao, CHEN Jian, et al. Smart Grid Situation Awareness Diagram Modeling and Conceptual Design of Situation Awareness Visualization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 168-176.

[9] FEIBUSH E, GAGVANI N, WILLIAMS D. Visualization for Situational Awareness[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2000, 20(5): 38-45.

[10] 李洋，谢新月，曹成哲．浅谈现代战斗机座舱显控系统的现状与发展趋势[J]．科技资讯, 2009, 7(12): 9-10.
LI Yang, XIE Xin-yue, CAO Cheng-zhe. Discussion on the Present Situation and Development Trend of Modern Fighter Cockpit Display and Control System[J]. Science & Technology Information, 2009, 7(12): 9-10.

[11] 张蓬蓬．空战体系演变及智能化发展[J]．飞航导弹，2019(3): 60-64.
ZHANG Peng-peng. Evolution of Air Combat System and Intelligent Development[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2019(3): 60-64.

[12] HOLOVATCH Y. Complex Systems: Physics Beyond Physics-IOPscience[J]. European Journal of Physics, 2017, 38(2): 1-19.

[13] GASSON S. Human-Centered Vs. User-Centered Approaches to Information System Design[J]. Journal of Information Technology Theory and Application, 2003, 5(2): 29-46.

[14] The d-n-i echo: The Essence of Winning and Losing [EB/OL]. (2021-03-24)[2021-11-01]. https://web.archive.org/web/20110324054054/http://www.danford.net/boyd/essence.htm.

[15] 杨伟．关于未来战斗机发展的若干讨论[J]．航空学报, 2020, 41(6): 524377.
YANG Wei. Development of Future Fighters[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(6): 524377.

[16] 张德斌，郭定，马利东，倪祥征．战斗机座舱显示的发展需求[J]．电光与控制, 2004, 11(1): 53-55.
ZHANG De-bin, GUO Ding, MA Li-dong, et al. Requirements for Development of Cockpit Display on Fighters[J]. Electronics Optics & Control, 2004, 11(1): 53-55.

[17] 娄明，肖旺群．基于整合思想的机械产品形象设计策略研究[J]．包装工程, 2017, 38(2): 115-119.
LOU Ming, XIAO Wang-qun. Mechanical Product Image Design Based on Integration Theory[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(2): 115-119.

[18] 朱丰，胡晓峰．基于深度学习的战场态势评估综述与研究展望[J]．军事运筹与系统工程，2016，30(3): 22-27.
ZHU Feng, HU Xiao-feng. Review and Research Prospect of Battlefield Situation Assessment Based on Deep Learning[J]. Military Operations Research and Systems

Engineering, 2016, 30(3): 22-27.
[19] MICA R E. Designing for Situation Awareness | An Approach to User-Centered Desig[M]. Florida: CRC Press, 2012.
[20] MICA R E. Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement[J]. Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting, 1988, 32(2): 97-101.
[21] MORADI-PARI E, TAHMASBI-SARVESTANI A, FALLAH Y P. A Hybrid Systems Approach to Modeling Real-Time Situation-Awareness Component of Networked Crash Avoidance Systems[J]. IEEE Systems Journal, 2016, 10(1): 169-178.
[22] STIRLING L, SIU H C, JONES E, et al. Human Factors Considerations for Enabling Functional Use of Exosystems in Operational Environments[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(1): 1072-1083.
[23] FRACKER M. Measures of Situation Awareness: Review and Future Directions[J]. Pschology, 1991, 1(1): 37-39.
[24] FLACH J M. Situation Awareness: Proceed with Caution[J]. Human Factors: the Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 1995, 37(1): 149-157.
[25] ENDSLEY M R. Measurement of Situation Awareness in Dynamic Systems[J]. Human Factors: the Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 1995, 37(1): 65-84.
[26] ENDSLEY M. Situation Models: An Avenue to the Modeling of Mental Models[J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2000, 44(1) 77-80.
[27] BO H, GE S. Situational awareness is more than exceptional vision.[J]. Aviat Space Environ Med, 1991, 62(1) 201-214.
[28] WEI Heng-yang, ZHUANG Da-min, WANYAN Xiao-ru, et al. An Experimental Analysis of Situation Awareness for Cockpit Display Interface Evaluation Based on Flight Simulation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(4): 884-889.
[29] ENDSLEY M, GARLAND D, WAMPLER R, et al. Modeling and Measuring Situation Awareness in the Infantry Operational Environment[J]. Business, 2000, (1): 126.
[30] 胡洪波, 郭徽东. 通用作战态势图的构成与实现方法[J]. 指挥控制与仿真, 2006, 28(5): 28-32.
HU Hong-bo, GUO Hui-dong. Architecture and Techniques of Common Operational Situation Picture[J]. Command Control & Simulation, 2006, 28(5): 28-32.
[31] 吴佳鑫, 王健海. 基于态势感知理论的可视化感知模型[J]. 现代图书情报技术, 2010(S1): 9-14.
WU Jia-xin, WANG Jian-hai. A Visualization Awareness Model Based on Situation Awareness Theory[J]. New Technology of Library and Information Service, 2010(S1): 9-14.
[32] Airspace. The Wright Brothers[EB/OL]. (2016-05-14) [2022-01-06]. https://airandspace.si.edu/exhibitions/wright-brothers/online/.
[33] Pilot's Post. The first true bomber-The French Voisin III [EB/OL]. (2017-09-13)[2022-01-06]. http://www.pilotspost.com/arn0001563.
[34] HALLION R. Strike from the sky: the history of battlefield air attack 1911-1945[M]. Airlife Press, 1989.
[35] ChinaPower Project. Does China's J-20 rival other stealth fighters?[EB/OL]. (2017-02-15)[2021-08-06]. https://chinapower.csis.org/china-chengdu-j-20/.
[36] 李德仁. 论天地一体化的大测绘——地球空间信息学[J]. 测绘科学, 2004, 29(3): 1-2.
LI De-ren. On Integrated Earth Observation Systems of Geomatics[J]. Science of Surveying and Mapping, 2004, 29(3): 1-2.
[37] 李贺武, 吴茜, 徐恪, 等. 天地一体化网络研究进展与趋势[J]. 科技导报, 2016, 34(14): 95-106.
LI He-wu, WU Qian, XU Ke, et al. Progress and Tendency of Space and Earth Integrated Network[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(14): 95-106.
[38] BUZAN B, HERRING E. The arms dynamic in world politics[M]. Boulder: Lynne Rienner, 1998.
[39] 李凤华, 殷丽华, 吴巍, 等. 天地一体化信息网络安全保障技术研究进展及发展趋势[J]. 通信学报, 2016, 37(11): 156-168.
LI Feng-hua, YIN Li-hua, WU Wei, et al. Research Status and Development Trends of Security Assurance for Space-Ground Integration Information Network[J]. Journal on Communications, 2016, 37(11): 156-168.
[40] "Basic T"–The Six-pack Instrument–ABCD.XXX[EB/OL]. (2019-03-18)[2022-01-11]. https://studyflying.com/basic-t-the-six-pack-instrument/.
[41] F-104G Starfighter-Inside The Cockpit-YouTube[EB/OL]. (2021-04-16) [2022-01-09]. https://www.youtube.com/watch?v=wkw1N332zDI.
[42] NIJBOER D. Fighting Cockpits, In the Pilot's Seat of Great Military Aircraft from World War I to Today[M]. Minnesota: Zenith Press, 2016.
[43] ADAM E C. Fighter Cockpits of the Future[C]// 1993 Proceedings AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Fort Worth: IEEE, 1993: 318-323.
[44] MCCARTY W D, SHEASBY S, AMBURN P, et al. A Virtual Cockpit for a Distributed Interactive Simulation[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1994, 14(1): 49-54.
[45] RASH C E, RUSSO M B, LETOWSKI T R, Helmet-Mounted Displays: Sensation, Perception and Cognition Issues[R]. Fort Rucker: Army aeromedical research lab fort rucker al, 2009.
[46] 高源, 刘越, 程德文, 等. 头盔显示器发展综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(6): 896-904.
GAO Yuan, LIU Yue, CHENG De-wen, et al. A Review on Development of Head Mounted Display[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016,

28(6): 896-904.

[47] 程德文, 王涌天, 常军, 等. 轻型大视场自由曲面棱镜头盔显示器的设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 309-311.
CHENG De-wen, WANG Yong-tian, CHANG Jun, et al. Design of a Lightweight and Wide Field-of-view Hmd System with Free-form-surface Prism[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 309-311.

[48] LIGIER V. Multimodal Cockpit: Next-generation Human-system Interaction[C]// ERGO'IA 2021. Bidart: FOSS 2021.

[49] ROUSSEAU C, BELLIK Y, VERNIER F, et al. A Framework for the Intelligent Multimodal Presentation of Information[J]. Signal Processing, 2006, 86(12): 3696-3713.

[50] RASENBERG M, ÖZYÜREK A, DINGEMANSE M. Alignment in Multimodal Interaction: An Integrative Framework[J]. Cognitive Science, 2020, 44(11): e12911.

[51] ATAC R, FOXLIN E. Scorpion hybrid optical-based inertial tracker (HObIT)[C]// Head-and Helmet-Mounted Displays XVIII: Design and Applications. Washington: NASA, 2013.

[52] DEL CASTILLO J A L, COUTURE N. The Aircraft of the Future: Towards the Tangible Cockpit[C]// HCI-Aero'16: Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace. New York: ACM, 2016.

[53] 栗阳, 关志伟, 陈由迪, 戴国忠. 基于手势的人机交互的研究[J]. 系统仿真学报, 2000, 12(5): 528-533.
LI Yang, GUAN Zhi-wei, CHEN You-di, et al. Research on Gesture Based Human Computer Interaction[J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2000, 12(5): 528-533.

[54] BEHÚN K, PAVELKOVÁ A, HEROUT A. Implicit Hand Gestures in Aeronautics Cockpit as a Cue for Crew State and Workload Inference[J]. 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2015: 632-637.

[55] PISHARADY P K, SAERBECK M. Recent Methods and Databases in Vision-Based Hand Gesture Recognition: A Review[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2015, 141: 152-165.

[56] SHNEIDERMAN B. Touch Screens Now Offer Compelling Uses[J]. IEEE Software, 1991, 8(2): 93-94.

[57] DEGANI A, PALMER E A, BAUERSFELD K G. "Soft" Controls for Hard Displays: Still a Challenge[J]. Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting, 1992, 36(1): 52-56.

[58] JONES D R. Three Input Concepts for Flight Crew Interaction with Infor-mation Presented on a Large-screen Electronic Cockpit Dis-play[J]. NASA Technical Memorandum, 1990, 4173 (1):1-32.

[59] JAN M N, ALISON F. S. A Comparison of Speech Input and Touch Screen for Executing Checklists in an Avionics Application[J]. The International Journal of Aviation Psychology, 2007, 17(3): 104-128.

[60] AVSAR H, FISCHER J E, RODDEN T. Designing touch screen user interfaces for future flight deck operations[C]// 2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Sacramento, CA: IEEE, 2016: 1-9.

[61] 冯悦, 王言伟, 耿欢. 战斗机智能座舱人机交互方式发展及应用[J]. 飞机设计, 2020, 40(4): 54-58.
FENG Yue, WANG Yan-wei, GENG Huan. Development and Application of Human-Computer Interaction Mode of Fighter Smart Cockpit[J]. Aircraft Design, 2020, 40(4): 54-58.

[62] HARALSON D G, REISING J M, GHRAYEB J. Toward the Panoramic Cockpit, and 3-d Cockpit Displays[C]// Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference. Dayton, OH: IEEE, 1989: 80-85.

[63] HOPPER D G , BLANTON R B , MARTICELLO D N. Large-area High-definition Cockpit Displays[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1995, 6(5): 12.

[64] TEUTSCH J, HOFFMAN E. Aircraft in the Future Atm System-Exploiting the 4d Aircraft Trajectory[C]// The 23rd Digital Avionics Systems Conference. Salt Lake City: IEEE, 2004(3): 2-31.

[65] SNOW M P, REISING J M. Effect of Pathway-In-The-Sky and Synthetic Terrain Imagery on Situation Awareness in A Simulated Low-level Ingress Scenario[R]. Wright-Patterson AFB: Air Force Research Lab, 1999.

[66] CANINO-RODRÍGUEZ J M, GARCÍA-HERRERO J, BESADA-PORTAS J, et al. Human Computer Interactions in Next-Generation of Aircraft Smart Navigation Management Systems: Task Analysis and Architecture under an Agent-Oriented Methodological Approach[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2015, 15(3): 5228-5250.

[67] 刘宏宇, 巩森森, 梁峭. 具身认知视角下的人——智能体交互的意向立场[J]. 包装工程, 2022, 43(2): 145-151.
LIU Hong-yu, GONG Miao-sen, LIANG Qiao. Intentional Stance of Human-Agent Interaction from the Perspective of Embodied Cognition[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(2): 145-151.

[68] RICHARD J, BOLAND J R. The Process and Product of System Design[J]. Management Science, 1978, 24(9): 105-131.

[69] GERLACH J H, KUO Feng-yang. Understanding Human-Computer Interaction for Information Systems Design[J]. MIS Quarterly, 1991, 15(4): 527.

[70] BASKERVILLE R. Information Systems Security Design Methods: Implications for Information Systems Development[J]. ACM Calculation Survey, 1993, 25(4): 375-414.

[71] SARTER N B, WOODS D D. "from Tool to Agent": The Evolution of (Cockpit) Automation and Its Impact on

Human-Machine Coordination[J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 1995, 39(1): 79-83.

[72] 姚莉, 张维明, 王长缨, 龚勇. 基于多智能体的复杂信息系统开发方法研究[J]. 管理科学学报, 2002, 5(5): 44-54.
YAO Li, ZHANG Wei-ming, WANG Chang-ying, et al. Research on Modeling Method of Complicated Information System Based Multiple Intelligent Agents[J]. Journal of Manegement Sciences in China, 2002, 5(5): 44-54.

[73] 魏洪涛, 李群, 王维平. 基于 Web 的管理信息系统的安全模型设计[J]. 计算机应用, 2003, 23(5): 77-80.
WEI Hong-tao, LI Qun, WANG Wei-ping. Security Model Design for Web Based MIS[J]. Computer Applications, 2003, 23(5): 77-80.

[74] GREGOR. The Nature of Theory in Information Systems[J]. MIS Quarterly, 2006, 30(3): 611.

[75] ALLEN P M, VARGA L. A Co-Evolutionary Complex Systems Perspective on Information Systems[J]. Journal of Information Technology, 2006, 21(4): 229-238.

[76] FILIP F G. Decision Support and Control for Large-Scale Complex Systems[J]. Annual Reviews in Control, 2008, 32(1): 61-70.

[77] Acm Digital Library. Persuasive System Design: State of the Art and Future Directions[EB/OL]. (2009-04-06) [2022-01-02]. https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/1541948.1541989?casa_token=BbpejqvIfK4AAAAA:m-MftM7xRYBkvTt7trPaEaEpzT51K9gQdH5rpLGI13OLc7ERN0nnmmvhObJIHiDmVJ7CYeamIArmVA.

[78] TANRIVERDI H, RAI A, VENKATRAMAN N. Research Commentary—Reframing the Dominant Quests of Information Systems Strategy Research for Complex Adaptive Business Systems[J]. Information Systems Research, 2010, 21(4): 822-834.

[79] 卞婷, 薛澄岐, 仇岑. 涡轮喷气发动机状态显示生态界面设计[J]. 机械设计与制造, 2010(12): 9-11.
BIAN Ting, XUE Cheng-qi, QIU Cen. Ecological Interface Design for a Turbojet Engine[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(12): 9-11.

[80] 戴玉祺, 薛澄岐. 复杂界面辅助设计软件的设计方法[J]. 设计, 2017(16): 129-131.
DAI Yu-qi, XUE Cheng-qi. Design Method of Complex Interface Aided Design Software[J]. Design, 2017(16): 129-131.

[81] 赵欣, 丁怡, 侯文军, 等. 复杂信息系统界面可用性指标体系研究[J]. 图学学报, 2018, 39(4): 716-722.
ZHAO Xin, DING Yi, HOU Wen-jun, et al. On the Usability Evaluation Index System of Complex Information System Interface[J]. Journal of Graphics, 2018, 39(4): 716-722.

[82] ZMUD W R. Design Alternatives for Organizing Information Systems Activities on JSTOR[J]. MIS Quarterly, 1984, 8(2): 79-93.

[83] JAFFE E. Finding Our Minds: An APS Award Address by David Meyer[J]. APS Observer, 2008(21): 106-109.

[84] 左银龙, 黄志球, 高鹏, 张本柱, 左敦稳. 分布式多层应用系统的设计与实现[J]. 计算机工程, 2001, 27(3): 176-177.
ZUO Yin-long, HUANG Zhi-qiu, GAO Peng, et al. Design and Implementation of Distributed Multilayer Application Systems[J]. Computer Engineering, 2001, 27(3): 176-177.

[85] SARTER N B, WOODS D D. Team Play with a Powerful and Independent Agent: Operational Experiences and Automation Surprises on the Airbus A-320[J]. Human Factors, 1997, 39(4): 553-569.

[86] 傅攀峰, 罗鹏程, 周经伦. 空战武器体系超视距空战能力指标研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(8): 1072-1075.
FU Pan-feng, LUO Peng-cheng, ZHOU Jing-lun. Research on the BVR Air Combat Capability Index of Air-to-Air Weapon Systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(8): 1072-1075.

[87] 高劲松, 陈哨东. 国外隐身战斗机超视距空战问题[J]. 电光与控制, 2011, 18(8): 17-20.
GAO Jin-song, CHEN Shao-dong. Beyond-Visual- Range Air Combat of Foreign Stealth Fighters[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(8): 17-20.

[88] 张彬乾, 罗烈, 陈真利, 等. 飞翼布局隐身翼型优化设计[J]. 航空学报, 2014, 35(4): 957-967.
ZHANG Bin-qian, LUO Lie, CHEN Zhen-li, et al. On Stealth Airfoil Optimization Design for Flying Wing Configuration[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(4): 957-967.

[89] 魏强, 周德云. 基于专家系统的无人战斗机智能决策系统[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(2): 5-7.
WEI Qiang, ZHOU De-yun. Research on UCAV's Intelligent Decision-Making System Based on Expert System[J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32(2): 5-7.

[90] The MIT Press. Victor Papanek [EB/OL]. (2021-04-06) [2021-11-02]. https://mitpress.mit.edu/books/victor-papanek.

[91] STEVENS J, MOULTRIE J, CRILLY N. Design Dis-Integration Silent, Partial, and Disparate Design[C]// Proceedings of the Design Research Society Conference2008. Sheffield: Design Research Society Conference, 2008.

[92] TICHKIEWITCH S, BRISSAUD D. Methods and Tools for Co-operative and Integrated Design[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2004.

[93] 宋晔皓. 托马斯·赫尔佐格的整合设计[J]. 世界建筑, 2004(9): 69-70.
SONG Ye-hao. Thomas Herzog's Integrated Planning in the Architectural Design[J]. World Architecture, 2004(9): 69-70.

[94] LEWIS M. Integrated Design for Sustainable Buildings[J]. ASHRAE Journal, 2004, 46(9): 135-136.

（下转第 44 页）