

“智慧防救”概念与发展展望

苏炳君,宋国庆

中航工业航宇救生装备有限公司 航空防护救生技术航空科技重点实验室,湖北 襄阳 441000



摘要:随着人工智能、脑电、眼动、AR及柔性电子等前沿技术的应用研究,防护救生系统不仅在向智能化方向发展,而且拓展出新的功能。针对防护救生系统的技术现状与发展趋势,本文提出了“智慧防救”概念,并定义了其概念内涵,在系统工程研究的基础上,从总体架构、主动防护、智能弹射救生、人机穿戴交互、椅载融控平台等方面对智慧防救的功能架构进行了系统的论述,并就涉及的多生理参数采集、“智慧座椅”“智慧头盔”等典型技术的发展进行了展望,结果表明“智慧防救”的研究意义和发展价值极大。

关键词:智慧防救;防护救生;人工智能;人机混合智能;人机穿戴交互

中图分类号:V244

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.07.001

在未来智能战机座舱中,人与机器协同融合、互相取长补短将形成一种新的“1+1>2”的增强型智能,也就是人机混合智能^[1]。作为座舱内人机联系的纽带和人机综合的桥梁,防护救生系统具有提升人机混合智能的天然便利优势。传统的防护救生系统具有正常飞行防护和应急弹射救生两大功能,引入人工智能,传统的防护救生向主动防护、智能弹射救生发展;通过智能穿戴,拓展出第三大功能——人机穿戴交互,由此形成智慧防护救生系统,简称“智慧防救”,能在提升飞行员生命安全与保障防守属性的同时,提高飞行员态势感知、决策响应、机能增强等进攻属性,对于建设以飞行员为中心、以提升人机混合智能为核心的新质攻防兼备平台具有重要意义。由于“智慧防救”将主动防护、智能弹射救生及人机穿戴交互三大功能汇集在一个大系统内进行研究,系国内外首例,故采用系统工程的正向设计方法开展了智慧防救总体技术研究,意在从总体上把握智慧防救的发展方向与发展脉络,为智慧防救的进一步发展奠定技术基础。由于篇幅所限,本文重点论述智慧防救的功能架构,并就典型关键技术进行展望。

1 概念内涵定义

智慧防救在传统防护救生的基础上,通过自行感受及与座舱信息共享,感知飞行员生理、行为与意图、所需自身状态、座舱内外环境、飞机状态及任务认知等信息,通过椅

载开放式多信息融合与综合控制(简称椅载融控)平台,基于自主控制等级与控制逻辑、策略数据库和人工智能,自动推理、演算及预判,制定人机分配、信息推送、感知告警、行动响应等决策,并适时发出行动指令,实现主动防护、智能弹射救生及人机穿戴交互三大功能。

智慧防救在飞机正常飞行时为飞行员遂行任务提供智能化的能力支撑,包括必要的舒适乘坐与安全约束、各种人机环境下的主动防护、各种态势下的人机交互等;在飞机不可挽回时为飞行员的生命安全提供智能弹射救生能力保障,确保飞行员迅速离机及安全救生,并为着陆/水后的生存与救援提供能力支持。

2 系统工程研究概述

本文系统工程研究包括需求定义与分析、架构定义与权衡分析、架构设计等。因本文属于基础研究的范畴,故仅识别出主要利益攸关者,智慧防救的全生命周期运行场景仅选择“执行任务”这一场景,同时为缩小研究范围,仅选择正常飞行、陆/水上弹射作为分场景。通过需求定义与分析,得到智慧防救系统需求;通过架构定义与权衡分析,选出一种满足系统需求的智慧防救总体架构;通过架构设计,为主动防护、智能弹射救生、人机穿戴交互及椅载融控平台四大子系统选取最佳的子系统功能构架(分解分配至下一、二级子系统)。

收稿日期: 2005-01-21; 退修日期: 2025-04-18; 录用日期: 2025-05-21

引用格式: Su Bingjun, Song Guoqing. The concept and development prospect of “intelligent life-support” [J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(7): 1-7. 苏炳君,宋国庆. “智慧防救”概念与发展展望[J]. 航空科学技术, 2025, 36(7): 1-7.

3 功能架构

3.1 总体架构

主动防护、智能弹射救生及人机穿戴交互三大功能是提出“智慧防救”概念的基础,三大功能必然带来大数据量的信息采集、处理、分发和使用需求,集中设置一个算力强大、策略丰富的大数据运算处理平台是非常必要的,考虑到这个平台在人椅系统弹射离机后也要使用,理应安装在弹射座椅上,故称之为椅载融控平台。智慧防救总体架构由主动防护、智能弹射救生、人机穿戴交互及椅载融控4部分组成。

智慧防救属于智能化装备范畴,智能化装备具有感知、决策、行动三个功能特征。将智慧防救三大功能的决策功能集中,并纳入椅载融控功能模块,三大功能仍能构建各自的“感知—决策—行动”功能流程,如图1所示,椅载融控功能也能对智慧防救全系统进行多信息融合与综合逻辑控制,确保全系统高效正常运行。

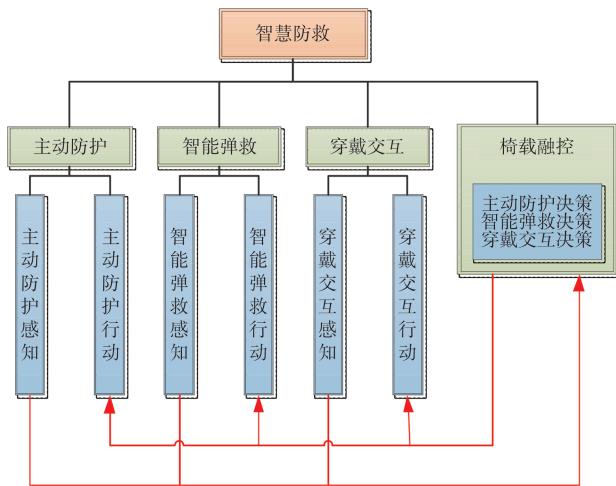


图1 总体架构

Fig.1 The overall architecture

3.2 主动防护

传统的飞行员个体防护系统属于被动型,无法实现飞行员个体生理实时需求的个性化防护,主动防护功能从缺氧、过载、疲劳、意识唤醒、空间定向障碍、应激、热负荷等人机环境典型要素着手,通过防护感知功能采集血氧、眼水平压、耳脉搏波、脑电、眼动、心率、体温、呼吸、血压等多种生理参数信息,设置飞行员各项生理阈值,与智能弹射救生感知信息、座舱共享信息一起传入椅载融控平台,经平台及其内置的主动缺氧/过载/疲劳/空间定向障碍/应激/热负荷防护、意识唤醒等策略运算、推理、预判、决策,并实时发送行

动指令,分别进行主动缺氧防护行动(包括氧浓度调节、供氧流量调节、智能代偿作动、接通椅氧、缺氧预警)、主动过载防护行动(包括智能抗荷作动、颈部防护、座椅坐姿调节、过载预警)、主动疲劳防护行动(包括氧浓度调节、颈托、按摩、穴位刺激、座椅坐姿调节、腰部支撑调节/按摩、舒适性组件加热、疲劳预警与交互)、意识唤醒行动(包括供纯氧、穴位刺激、座椅坐姿调节、唤醒刺激)、主动空间定向障碍防护行动(包括空间定向障碍告警)、主动应激防护行动(包括按摩、穴位刺激、应激预警、心理疏导)、主动热负荷防护行动(包括躯干通风、头部散热、热负荷预警)等,如图2所示。

3.3 智能弹射救生

按使用场景划分,智能弹射救生功能可划分为飞行前快速准备、飞行中工效维持、应急弹射等功能,如图3所示。

飞行前快速准备包括当前用户识别、安全性诊断与管理、眼位自动对准、个性参数测量、推力矢量预调节、自主等级设置等功能。当前用户识别功能识别飞行员身份,并重置当前用户,便于收集用户体验数据。安全性诊断与管理功能实时获取飞行员的穿戴约束、肩腰部受力、保险销安装、火工品安装等状态信息,经安全性诊断与管理策略运算处理并发送告警信息,实现安全隐患告警。眼位自动对准功能通过实时获取飞行员眼位数据,经眼位自动对准策略运算处理并发送指令,进行眼位不准预警,并通过座高/坐姿调节实现眼位自动对准。个性参数测量功能通过个性参数测量及个性参数策略运算处理,获取人椅系统重量、重心等个性参数。推力矢量预调节功能基于个性参数和推力矢量预调节策略,实现推力矢量预调节。自主等级设置功能通过飞行员输入命令,调出菜单,推送至飞行员眼前,飞行员选择选项进行设置,并能根据实际使用需要,随时更改设置。

飞行中工效维持包括躯干智能约束、安全性诊断与管理、椅载舒适性、自主等级控制等功能。躯干智能约束功能通过监测人椅系统状态和接收座舱共享数据,经躯干智能约束策略运算处理并发送指令,对飞行员躯干进行智能主动约束。椅载舒适性功能纳入主动疲劳防护功能,在主动疲劳防护策略的统一管理下,适时实施坐姿调节、腰部支撑调节/按摩、舒适性组件加热等功能。自主等级控制功能按照当前用户的自主等级设置情况,经自主等级控制策略判断并发送行动指令,直接实现自主等级所控制的功能,或通过自主等级控制交互得到飞行员的反馈后再实施或取消自主等级所控制的功能。

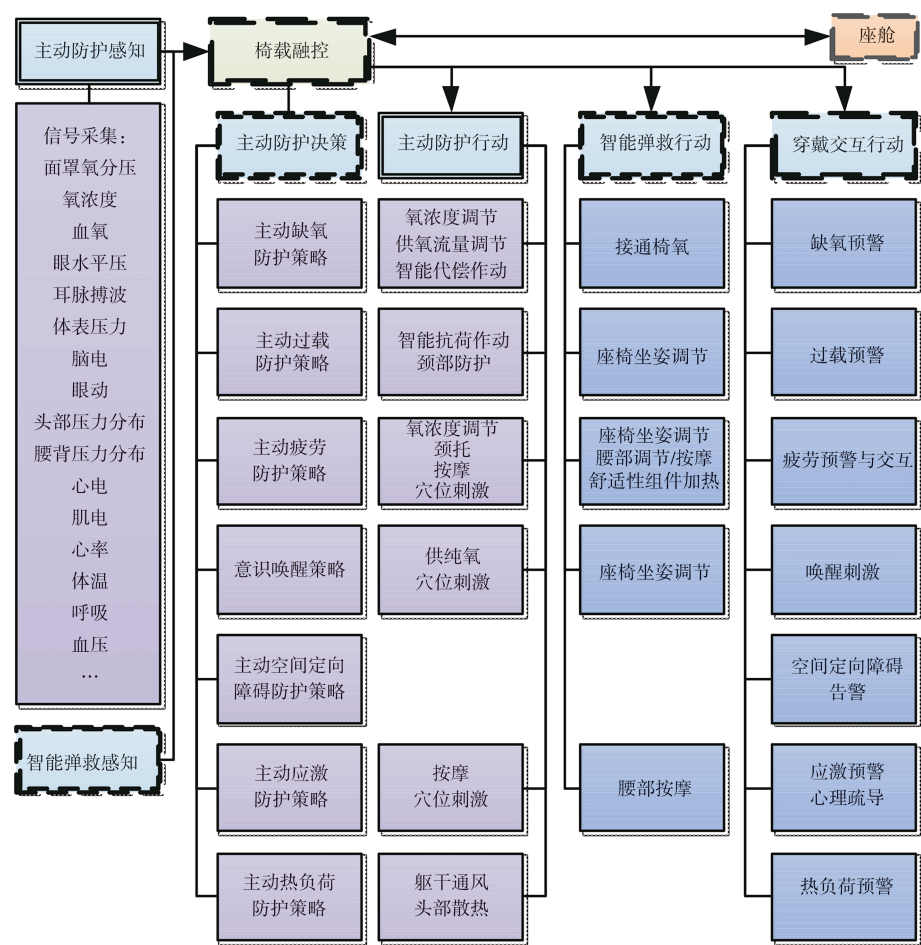


图2 主动防护

Fig.2 The active protection

应急弹射包括障碍物识别与定位、弹射预警、弹射启动、自主等级控制、意识唤醒、高频多轴姿态与轨迹控制等功能。障碍物识别与定位功能在座椅出舱前,由飞机对周围障碍物进行识别与定位,并将障碍物信息共享;在座椅出舱后,由座椅对周围障碍物进行识别与定位。弹射预警功能通过实时监测障碍物、人椅系统状态(含相对地高)等信息,经弹射预警策略实时预算、判断出当前弹射预警等级,通过座舱和穿戴装备两种途径进行弹射预警。弹射启动功能受自主等级控制;拔出所有地面和空中保险销后,在任何情况下均能手动启动弹射;当弹射预警达到最高危等级时,按照当前用户的自主等级设置情况,经自主等级控制策略判断并发送行动指令,直接实现自动弹射启动,或通过自主等级控制交互得到飞行员的反馈后再实施或取消自动弹射启动。在弹射出舱后至射伞分离前,判断飞行员是否昏迷,必要时进行唤醒刺激。高频多轴姿态与轨迹控制功能通过实时监测障碍物、人椅系统状态(含相对地高)及推力矢量

状态信息,经高频多轴姿态与轨迹控制策略推理、演算及判断,并实时发送行动指令,闭环控制高频多轴推力矢量火箭工作,适时启动或阻断相关执行机构工作,实现智能飞行控制。

3.4 人机穿戴交互

人机穿戴交互可以满足视觉、三维(3D)语音、触觉、脑电、眼动、手势等交互功能需求。人机穿戴交互感知功能包括语音输入、脑电意图采集、眼动意图跟踪及手势意图采集等;人机穿戴交互行动功能包括增强现实(AR)光学显示、3D语音收听、触觉振动、语音/脑电/眼动/手势操控等,如图4所示。

视觉交互功能通过接收飞机提供的头盔显示器信息和其他需在头盔显示器上显示的信息,经视觉交互策略进行信息融合后,通过AR光学显示功能,为飞行员显示字符、图像、视频等信息。

3D语音交互功能通过耳机向飞行员提示带有威胁来

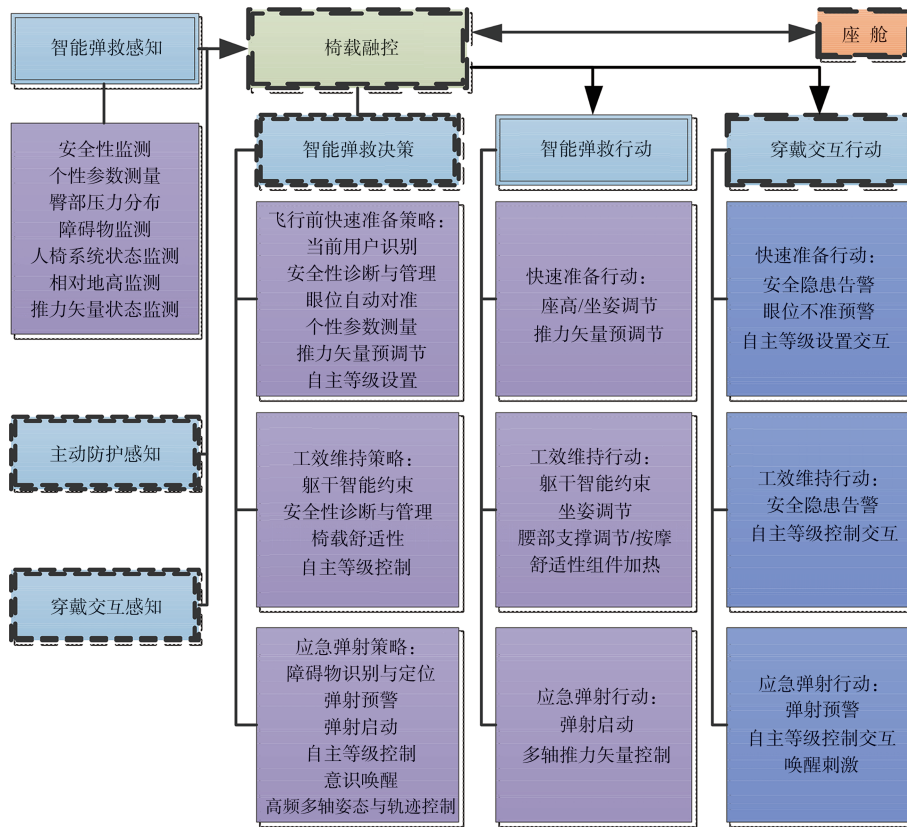


图3 智能弹射救生

Fig.3 The intelligent ejection lifesaving

袭方位、距离、速度和威胁类型的告警信息；能够实现消息空间分离，保证飞行员同时关注多条消息。

语音输入、脑电/眼动/手势意图等信息均可经相应交互策略推理判断，并发送指令，通过AR光学显示、语音收听功能实现飞行员所想信息相关画面、语音、菜单的显示、播报、滚动、缩放、选择、确认等常规操作，眼动交互还能实现目标快速定位、锁定；通过语音/脑电/眼动/手势操控功能启动相关联的特定功能，如启动坐姿调节、飞机爬升等。

触觉交互功能通过调用飞行姿态、位置和运动状况等态势信息，经触觉交互策略计算和转换，以一定的频率和强度输出指令，在飞行员头部、手臂或躯干等部位形成相应的触觉振动，以获取态势信息触觉感知；还能实现特定事件的触觉感知，如空间定向障碍告警、唤醒刺激等。

3.5 椅载融控平台

椅载融控平台是一个算力强大、策略丰富的大数据运算处理平台，承担智慧防救全系统的多信息融合与综合控制功能，确保全系统资源合理利用，并高效、有序、正常地运转。该平台采用标准的机箱架构方式，接口与机电综合管理系统(IEMS)^[2]保持一致；信息融合架构具有扩展性，便于

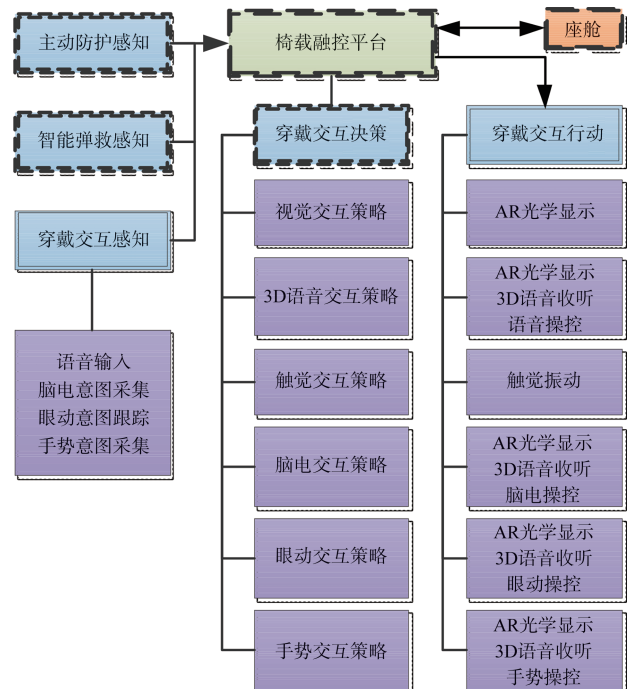


图4 人机穿戴交互

Fig.4 The human-machine wearable interaction

今后功能的拓展和技术的升级。

椅载融控平台内置全系统多信息融合与综合控制逻辑策略：一是系统级决策，包括当前用户识别及重置、自主等级设置与控制、信息优先级及多通道推送与分配、行动优先级、历史数据收集与学习进化、专家助手与辅助决策、安全性诊断与管理、故障诊断与健康管理等决策；二是主动防护决策，包括主动缺氧/过载/疲劳/空间定向障碍/应激/热负荷防护、意识唤醒等决策；三是智能弹射救生决策，飞行前包括当前用户识别及重置、安全性诊断与管理、眼位自动对准、个性参数测量与重置、推力矢量预调节、自主等级设置等快速准备决策；飞行中包括躯干智能约束、安全性诊断与管理、主动疲劳防护、自主等级控制等工效维持决策；应急弹射时包括障碍物识别与定位、弹射预警、弹射启动、自主等级控制、意识唤醒、高频多轴姿态与轨迹控制等决策；四是人机穿戴交互决策，包括视觉、3D 语音、触觉、脑电、眼动、手势等交互决策。

椅载融控平台能提供强大的算力，提高线上智慧防救的响应速度、处理能力并保证一定的学习能力，满足智慧防救的实时性、准确性和安全性要求。

4 典型关键技术及其发展

4.1 多生理参数采集技术

智慧防救需要采集大量的飞行员人体生理参数，这些生理参数只有通过与飞行员贴身的智能穿戴装备才能获得，故而柔性电子技术得以应用。柔性可穿戴传感器可以将各种生命体征信号实时地转换为可测量的电信号（如电容、电阻、电流和电压等），可分为物理、化学和电生理传感器。物理传感器能检测受到的机械力（如运动、呼吸、脉搏跳动、心脏跳动等）、温度或光学刺激导致的电信号变化。化学传感器通过可定制以响应特定化学物质（如汗液）的电极以识别或量化目标物（包括离子、分子、蛋白质等）。电生理传感器可以连续实时记录心脏、大脑、肌肉等特殊组织的电极之间的电势差，获得心电图（ECG）、脑电图（EEG）和肌电图（EMG）^[3]。高质量的柔性可穿戴传感器应该具备灵敏度高、响应时间短、易加工、成本低，以及柔韧性、稳定性、耐用性、线性度、准确性好等优点，柔性化、微型化、智能化及多功能化将是其未来的发展趋势^[4]。目前柔性可穿戴电子系统在长期或复杂环境工作的可靠性、系统的供电能力、多传感功能集成、批量生产、无线数据传输等方面还有进一步的发展空间^[5]，面对航空机载复杂环境，在智慧防救上应用也有大量的技术问题有待研究。

发展可用于可穿戴电子的能够持续长时间稳定工作的自供能传感系统是具有重要实用意义的研究工作^[6]。柔性自供能技术基于飞行员在任务执行、应急离机、长时间生存待救等任务场景中需要持续为智能穿戴装备供能的关键性需求，对作业环境中的机械能^[6]（如机械振动、冲击、摩擦、呼吸等）、热能^[6]（如人体温差）、声能（如环境噪声）等微能量及太阳能进行分析归集，探索多效应融合发电技术、全固态柔性超级储能制备工艺以及充/放电并行控制技术，提升能量收集及存储能力，实现器件柔性小型化，为智能穿戴装备在防护救生领域的应用提供技术支撑。

由于智慧防救采用柔性可穿戴传感器采集的参数较多，有线通信存在线缆复杂、重量大、灵活性差、维修和扩展难度大等不足，会给飞行员作业增加困难，故构建智慧防救自身的无线通信网络是非常必要的。智慧防救无线通信技术以座舱无线通信技术为牵引，解决机载环境下无线通信稳定高速实时传输、网络重构和低功耗等问题，实现智慧防救内部以及与座舱之间的无线通信组网与多源数据交互，促进无线通信技术在防护救生领域的研究与应用。

4.2 “智慧座椅”技术

“智慧座椅”的“智慧”主要体现在以下三个方面：一是飞行前快速准备显性化管理，将一系列飞行前准备工作按流程显性化，推送至飞行员眼前，通过人机交互及流程智能响应，有序完成准备工作，对整个过程进行智能化监管，确保准备工作快速且正确；二是飞行中智能化工效维持，包括躯干智能约束、安全性监管、椅载舒适性监管及自主等级控制等；三是智能弹射，包括弹射预警、自主等级控制下的弹射启动、高频多轴姿态与轨迹控制等。其中以人椅系统姿态与轨迹控制技术最为代表“智慧座椅”的“智慧”水平，国内外一直对此进行相关研究，如毛晓东等^[7]提出了一种全新的弹射座椅姿态控制规律设计方法；张明环等^[8]研究了一种基于H形火箭包的弹射座椅姿态控制算法等，这些研究推动了人椅系统姿态与轨迹控制技术的发展，但离高频多轴闭环智能控制还有一定的差距，在提出新的姿态与轨迹控制理念、研究适合于人椅系统姿态与轨迹控制的算法、高频多轴火箭发动机等方面还需要进行大量的研究工作。

4.3 “智慧头盔”技术

人机穿戴交互中的视觉、3D 语音、脑电、眼动及头部触觉等交互功能均集成在头盔上，因而可发展出自成一体的“智慧头盔”技术。智慧头盔顺应人机交互从以计算机为中心向着以人为中心的发展趋势，提供多通道人机交互界面，确保飞行员利用多个通道以自然、并行、协作的交互方式，

通过整合来自多个通道的精确的和不精确的输入来捕捉飞行员的交互意图,提高人机交互的自然性和高效性^[9]。

在现实任务环境中,人类认知信息主要依靠单一的视觉通道,其占用率达70%^[10],智慧头盔遵循此规律,通过光学系统构建大视场,以飞行员虚拟视网膜显示技术为基础,以头盔显示器为物理载体,完成虚拟战场环境构建与信息显示^[11],同时,采用多通道交互模式,合理分配和调用视觉外的其他通道,使得认知感受是丰满而立体的,认知效果远大于单一通道呈现方式。因此,需要对所有信息的优先级进行研究,以建立信息推送与分配的准则。

5 结束语

智慧防救引入人工智能、脑电、眼动、AR、柔性电子等前沿技术,能实现从被动非智能体向主动智能体的重大转变;以飞行员个性化的生理参数为基础,能实现从面向飞行员群体的粗犷普适性能向追求个体的精细寻优性能转变,事实上跨代发展的新一代防护救生技术,代表着防护救生的未来发展趋势与方向,能为满足未来智能战机的防护救生与人机穿戴交互需求,提高人机混合智能提供系统级的解决方案,其研究意义和发展价值极大。

AST

参考文献

- [1] 郭天宇,王鑫,欧阳小叶. 人机混合智能技术主要发展动向分析[J]. 无人系统技术, 2023, 6(1): 95-103.
Guo Dayu, Wang Xin, Ouyang Xiaoye. Analysis of main development trends of human-machine hybrid intelligence[J]. Unmanned Systems Technology, 2023, 6(1):95-103.(in Chinese)
- [2] 郭鹏,李亚晖,孙允明. 机载机电综合管理系统架构建模与仿真方法[J]. 电光与控制, 2017, 24(12): 100-105.
Guo Peng, Li Yahui, Sun Yunming. Architecture modeling and simulation methods of integrated electromechanical management system [J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(12):100-105. (in Chinese)
- [3] 夏香姣. 柔性可穿戴传感器的构建及其在健康监测中的应用[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2022.
Xia Xiangjiao. Construction of flexible wearable sensors and its applications in health monitoring [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022.(in Chinese)
- [4] 郑维伟,张弦. 柔性可穿戴传感器的研究进展[J]. 合成纤维, 2022, 51(3):39-43.
Zheng Weiwei, Zhang Xian. Research progress of flexible wearable sensors[J]. Synthetic Fiber in China, 2022, 51(3):39-43.(in Chinese)
- [5] 晚春雪,吴子悦,黄显. 柔性可穿戴传感与智能识别技术研究进展[J]. 中国科学:化学, 2022, 52(11): 1913-1924.
Wan Chunxue, Wu Ziyue, Huang Xian. Research progress in flexible wearable sensing and intelligent recognition techniques [J]. Scientia Sinica: Chimica, 2022, 52(11): 1913-1924. (in Chinese)
- [6] 李连辉. 多功能柔性可延展传感器研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2020.
Li Lianhui. Development of multifunctional flexible and stretchable sensors[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.(in Chinese)
- [7] 毛晓东,林贵平,郁嘉. 弹射座椅不利姿态控制规律设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(3): 426-434.
Mao Xiaodong, Lin Guiping, Yu Jia. Design of control law for ejection seat under adverse attitudes[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(3): 426-434.(in Chinese)
- [8] 张明环,吴铭,吴亮. 弹射座椅姿态控制算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2015, 33(4):609-614.
Zhang Minghuan, Wu Ming, Wu Liang. Researching attitude-control algorithm of ejection seats[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2015, 33(4):609-614.(in Chinese)
- [9] 王中明. 面向穿戴计算机的多通道人机交互系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.
Wang Zhongming. Research on multi-channel human-computer interaction system for wearable computer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.(in Chinese)
- [10] 陈慧娟. 飞机驾驶舱多通道人机交互设计研究[D]. 南京:东南大学, 2016.
Chen Huijuan. Research on multi-modal human-computer interaction design in cockpit[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.(in Chinese)
- [11] 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)

The Concept and Development Prospect of “Intelligent Life-Support”

Su Bingjun, Song Guoqing

Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Life-Support Technology, AVIC Aerospace Life-Support Industries, Ltd., Xiangyang 441000, China

Abstract: With the application and research of advanced technologies such as artificial intelligence (AI), EEG, eye movement, AR and flexible electronics, the life-support system is not only developing in the direction of intelligence, but also expanding new functions. In view of the technical status and development trend of the life-support system, this paper proposed the concept of “intelligent life-support” and defined its connotation. On the basis of system engineering research, this paper systematically discussed the functional architecture of the intelligent life-support system from the aspects of the overall architecture, the active protection, the intelligent ejection lifesaving, the human-machine wearable interaction, the seat-mounted control platform, etc., and prospected the development of typical technologies such as multi-physiological parameter acquisition, “intelligent seats” and “intelligent helmets”. The results show that the research significance and development value of “intelligent life-support” are extremely great.

Key Words: intelligent life-support; life-support; artificial intelligence; human-machine hybrid intelligence; human-machine wearable interaction