

眼控交互辅助复杂航电操作的人机协同机制研究

王玉琪 王 骞 杨 扬
陕西飞机工业有限责任公司 陕西 汉中 723200

摘 要：现代机载航电系统集成化程度持续提升，高密度信息排布与高频次任务切换大幅增加了操作人员的作业负担，传统手动交互模式在复杂工况下的响应短板逐步凸显。随着智能化航空装备迭代升级，多源传感数据融合、跨模块任务联动成为航电作业常态，进一步加剧了人工操作的匹配难度与响应压力。针对这一问题，本文围绕眼控交互辅助复杂航电操作的人机协同机制展开系统性梳理，从场景特性、作用机理、协同架构、运行优化四个维度逐层推进分析，明确眼控交互与手动操作的适配边界与互补逻辑，搭建动态权限切换与多任务协同的运行框架，为机载人机交互体系升级提供可行的技术路径支撑。

关键词：航电操作；眼控交互；人机协同；行为耦合；动态适配

引言：航空装备智能化升级进程中，航电系统承载的飞行管控与任务处理功能不断拓展，机载界面的信息密度与操作复杂度同步攀升。高空复杂飞行环境下，操作人员同时承担态势感知、参数管控、应急处置等多重职责，传统依托物理按键与触控界面的手动交互模式，逐渐难以适配动态多变的高强度作业节奏。眼控交互技术以视觉行为作为指令触发载体，可大幅压缩人机交互的行为链路长度，为破解当前航电操作的效率瓶颈提供了全新思路。探索眼控交互与传统手动操作的协同融合路径，对提升复杂工况下航电作业的响应速度与操作可靠性具备重要的工程实践价值。

1 复杂航电操作场景与人机交互特性研究

1.1 复杂航电系统操作场景构成与作业特征

现代机载航电系统集成多项飞行管控与任务处理功能，整体呈现高度集成化与模块化的布局特点。各类飞行参数监测、设备状态管控、任务指令处置功能集中于机载交互界面，形成高密度的机载操作场景。航电作业过程涵盖界面信息读取、参数状态核查、功能模式切换、应急状态处置等多项操作内容，不同操作内容穿插贯穿飞行全过程。飞行状态的动态变化会持续更新航电界面信息，界面数据更迭频次高、信息更新节奏快，对操作人员信息捕捉速度提出较高要求。各类操作任务具备穿插性与叠加性，单一飞行阶段可叠加多项管控任务，作业流程呈现多层次、多维度的分布形态。高密度信息排布与高频次任务切换，重塑机载操作的作业节奏，持续提升航电作业的操作复杂度^[1]。

1.2 传统航电人机交互模式与运行特征

传统航电人机交互依托物理按键、旋钮与触控界面完成指令输入，依靠肢体动作完成全部操作流程。操作

人员通过手部操控方式调取界面信息、切换系统功能、修正运行参数，实现对航电设备的状态管控。该类交互模式依托肢体运动传递操作意图，输入流程具备固定的步骤性与程序性，每一项功能调用都需要对应完整的操作链路。整套交互流程高度依赖手部精准操作与肢体配合，单次功能触发需完成定位、按压、确认等多步连贯动作。交互过程依赖人工主动完成步骤衔接，系统响应逻辑跟随人工操作节奏推进。信息输入、功能执行、状态反馈的流程划分清晰，操作链路具备较强的稳定性与规范性。固定化的操作步骤限制操作灵活度，无法适配动态多变的飞行作业节奏。

1.3 复杂工况下航电操作交互约束与局限分析

高空复杂飞行环境会增加操作人员的肢体操控负担，肢体活动范围与操作精准度受到不同程度限制。高强度飞行作业会持续积累操作人员认知负荷与体能负荷，削弱人工操作的响应效率与精细度。传统交互模式依赖分步手动操作，功能调取与参数管控需要占用一定作业时长，应对突发工况时的操作响应速度存在短板。多任务叠加的作业状态下，手动操作无法匹配高频次的信息处理需求，容易出现操作滞后与信息遗漏的情况。繁琐的肢体操作流程会占用操作人员注意力资源，分散对飞行态势与界面核心信息的关注力度。传统交互模式的操作延时与资源占用问题，会进一步放大复杂工况下的作业压力。恶劣飞行环境带来的姿态扰动与视觉干扰，会进一步压缩人工操作的容错空间，加剧交互适配不足的问题。

2 眼控交互技术适配航电操作的作用机理研究

2.1 眼动交互技术基础原理与交互逻辑

眼动交互技术依托视觉追踪传感机制捕捉人体眼部

运动状态,依托精准信号采集识别人员视觉关注点位与行为动态。技术运行核心依托眼部肌肉运动规律与视觉注视特征,转化人员主观操作意图为可识别的数字信号。硬件传感单元持续采集眼部注视坐标、视线移动轨迹、视觉停留时长等基础数据,通过内置算法完成原始数据的解析与筛选。系统依据标准化判别规则,区分注视、扫视、定点停留等不同眼动行为,对应匹配不同的交互指令逻辑^[2]。完整交互流程摆脱肢体操控媒介,以视觉行为作为指令触发载体,搭建人员与智能设备的直接信息交互链路。技术依托眼部自然运动特征完成指令触发,压缩人机交互的行为链路长度。

2.2 航电操作场景下眼控交互的适配特性分析

航电操作核心依托界面信息读取、点位选取、功能切换等精细化操作完成作业流程,高度匹配视觉行为的作业优势。眼控交互以视线聚焦作为操作触发条件,视线落点可直接对应航电界面功能区域,缩短操作输入的行为链路。视觉捕捉动作属于人体本能行为,无需繁琐的肢体操作步骤,能够降低航电作业的操作行为成本。面对航电界面高密度的信息排布状态,视觉视线可快速完成大范围界面扫描与重点信息锁定,适配高频次的界面切换与信息筛选需求。该交互方式无需占用手部操作资源,可独立完成界面选点、功能调取等轻量化航电操作。手部操作资源可全程保留用于关键参数调节与应急处置,优化机载操作的资源分配结构。

2.3 眼控交互替代传统操作的适配逻辑与适配边界

眼控交互依托轻量化、高灵敏的操作优势,可替代传统手动交互中的重复性、低难度航电操作环节。简单界面选取、常规信息调取、基础功能切换等操作,均可通过眼控交互方式完成,简化传统分步操控的繁琐流程。复杂精细参数调节、高风险应急指令输入等操作,对操作精度与容错率要求更高,不适用于眼控交互模式。结合航电操作任务的风险等级、操作难度与精细度要求,可划分两类交互方式的适用范围。依据任务操作精度需求、风险权重、流程复杂度,逐类界定眼控交互的可用场景与禁用场景,形成清晰、可落地的交互适配标准。

3 眼控辅助航电操作的人机协同架构与交互机制

3.1 眼控参与的航电人机协同层级架构搭建

融入眼控交互方式的航电人机协同体系,打破传统手动交互单一的作业架构模式。结合航电系统作业流程与眼动交互运行规律,可对整体协同体系进行结构化拆解。底层数据感知环节采集飞行员视觉行为数据、手部操作数据以及航电系统实时运行状态数据,完成多维

度作业信息的原始收录。中层意图解析环节针对眼动特征与操作行为开展深度解析,识别飞行员在航电界面操作、功能调取、状态核查中的作业意图。核心协同调度环节根据当前航电任务属性,分配眼控交互与手动交互的作业权重,统筹各类交互方式的运行流程。末端系统响应环节接收调度指令,完成航电功能执行、界面更新与状态反馈。各处理环节依次衔接、逐级解析,形成闭环式的人机数据流转通路^[3]。

3.2 飞行员视觉行为与航电操作行为耦合机制

飞行员视觉行为变化对应航电作业过程中的认知状态与操作倾向,能够直观反映航电任务推进节奏。视觉注视点位的分布状态,对应航电界面核心关注区域的选取逻辑。视线移动节奏与停留时长,映射界面信息读取进度与任务处理重点。航电操作行为的启动、推进与收尾,均会伴随规律性的视觉状态变化。梳理视觉捕捉、信息认知、操作执行的递进关系,挖掘视觉行为参数与航电操作动作的内在关联。依托视觉特征的前置变化规律,建立行为预判对应关系,实现操作动作的提前感知与精准匹配。

3.3 眼控交互与手动操作的协同互补运行机制

眼控交互擅长快速选点、界面切换、信息浏览等轻量化作业内容,具备响应速度快、无需肢体动作的作业优势。手动操作适配精细参数调节、关键指令输入、高稳定度功能操控等高精度作业内容,容错特性与操作稳定性更强。依据航电任务的操作难度与作业属性,划分两类交互方式的作业范畴。通过优劣互补、分工适配的运行模式,彻底解决单一交互模式的作业能力短板。低负荷、高频次的常规界面操作交由眼控交互完成,降低手动操作的作业压力。高精密、高优先级的核心管控任务依托手动操作落地,保障航电作业的稳定性与安全性。两类交互方式根据任务属性自动分配作业权限,填补单一交互模式的能力短板。

3.4 复杂航电任务下人机交互权限切换机制

复杂飞行工况会持续改变航电任务的复杂程度与作业优先级,交互方式的适配需求随之产生动态变化。平稳飞行阶段的常规航电管控任务,可开放眼控交互的主导权限,简化整体操作流程。突发工况、高强度任务叠加阶段,收紧眼控交互权限,提升手动核心操控的权限等级。结合任务复杂度、飞行工况状态与作业风险等级,设置多维度权限切换触发条件。构建动态化的权限流转规则,完成不同交互模式的权限转接与优先级更替。明确权限切换的前置判定条件,规避跨模式交互冲突与指令错乱问题。

4 眼控辅助航电人机协同运行优化方法研究

4.1 复杂飞行工况下眼控交互适配性优化思路

飞行过程包含平稳巡航、姿态调整、气流扰动、突发态势处置等多种工况状态,不同工况会改变飞行员头部姿态、视线角度与身体状态,间接影响眼动信号采集质量。机身姿态波动会造成视线点位偏移,外界光照变化会干扰眼部识别精度,各类复杂环境因素都会降低眼控交互的稳定程度。针对航电作业场景的环境特殊性,围绕眼控交互的稳定性与精准性搭建专项优化思路。针对工况波动带来的视线偏移问题,调整眼动信号采集与校正逻辑,适配飞行姿态动态变化产生的视线偏差。针对复杂光照环境对传感采集的干扰,强化原始眼动信号的筛选校正能力,过滤环境干扰带来的异常数据^[4]。结合不同飞行工况的扰动强度,划分差异化的眼控交互灵敏等级,调整信号识别阈值与指令判定标准。优化视线落点动态校准算法,适配飞行员作业姿态的实时变动。

4.2 人机协同交互逻辑的动态适配优化策略

常规固定化人机协同交互逻辑,难以匹配飞行过程中动态波动的作业状态与认知负荷状态。单一的交互运行规则无法覆盖不同强度、不同类型的航电作业任务,容易出现交互逻辑僵化、操作衔接生硬的问题。针对固定协同模式的运行短板,建立可动态调整的人机协同交互优化策略。摒弃一成不变的交互规则,实现协同模式随人员状态、任务场景、工况环境自适应调整。依托飞行员认知负荷变化规律,调整眼控交互介入深度与交互占比,适配人员作业状态的动态浮动。低负荷作业阶段放宽眼控交互运行条件,拓展眼控操作的覆盖范围,精简整体作业流程。高负荷作业阶段收紧交互判定标准,强化手动核心操作的主导地位,规范整体操作链路。结合航电任务的紧急程度与风险属性,更新交互响应优先级规则,调整不同交互行为的执行顺位。优化多级交互衔接逻辑,减少模态切换产生的指令延迟。

4.3 多任务叠加场景下人机协同配合优化机制

现代航电作业普遍存在多任务并行、多操作叠加的运行状态,信息读取、参数核查、功能切换、态势监测

等任务交叉开展,大幅提升人机协同的运行压力。多任务叠加状态下容易出现交互路径混乱、任务处理无序、操作资源浪费的问题,需要针对性的协同优化机制支撑作业推进。围绕多任务叠加的航电作业特征,搭建适配高密度作业场景的人机协同配合机制。依据航电任务的风险等级、处理时效与操作难度,建立任务分层排序规则,明确不同作业内容的处理顺位。拆分复杂复合任务的操作链路,拆解为独立的轻量化操作单元,分别匹配眼控交互与手动交互模式。合理分配人机操作资源,利用眼控交互完成批量、高频、低风险的辅助作业内容,集中人工操作资源处置核心、精密、高风险的关键任务内容。建立多任务并行状态下的交互调度规则,规整多任务同步推进过程中的资源分配秩序。

结束语

眼控交互与手动操作的深度融合,为复杂航电场景下的人机协同模式革新提供了扎实的实现基础。通过两类交互方式的优势互补,可在保留高风险操作稳定性的前提下,大幅降低重复性操作带来的资源占用,优化机载作业全流程的资源分配结构。这套协同机制能够有效适配多任务叠加的高密度作业场景,缓解复杂工况下操作人员的认知与体能负担,为后续机载交互系统的迭代升级提供清晰的落地方向,也为各类高可靠机载人机共融系统的设计搭建提供可复用的参考框架。

参考文献

- [1]凌仕翔,杨志斌,周勇.面向ARINC653操作系统的综合化航空电子软件代码自动生成方法[J].计算机科学,2024,51(7):10-21.
- [2]蔡力,刘伟,周蜜,等.航空电磁超材料沿面及组合间隙操作冲击电压放电特性[J].电机与控制学报,2022,26(5):46-54.
- [3]周焱,汪静,姜伟.支持航天员操作的电连接器设计与验证[J].航天器工程,2023,32(2):48-53.
- [4]高鹏飞.工业场所电气事故应急救援中的电工操作规范与流程设计[J].湖北应急管理,2026(10):18-20.