

面向SPO模式下飞行员混合式人机交互优化设计与分析研究

伏莱乐

温州森马协和国际学校，浙江温州

摘要：随着航空运输业的发展与运营成本压力的增大，单飞行员操作（SPO）模式因其在降低成本和缓解飞行员短缺方面的优势成为研究热点，但其核心挑战在于将双驾职责转移至飞行员与自动化系统的协同交互，而现有研究进展主要关注技术可行性与自动化改进，缺乏对人机交互具体操作动作的工效学分析。本文以起落架收放流程为例，对比传统手动、纯语音及混合交互三种模式，分析传统手动模式在SPO模式下因工作负荷高和冗余检查缺失易导致失误，同时纯语音控制虽降低负荷但存在噪声干扰和误识别风险。因此提出了一种语音指令与触觉反馈的混合式人机交互方案，通过双重验证机制兼顾效率与安全性，为SPO模式下关键操作提供可量化的交互设计方法。

关键词：单飞行员操作（SPO）；混合式人机交互；语音；触觉；起落架收放

Research on the Optimization Design and Analysis of Mixed Human-Machine Interaction for Pilots in SPO Mode

Laile Fu

Wenzhou Semir United International School, Wenzhou, Zhejiang

Abstract: With the growth of the aviation industry and increasing operational cost pressures, the Single-Pilot Operations (SPO) model has emerged as a research focus due to its potential to reduce costs and address pilot shortages. However, its core challenge lies in transferring the shared responsibilities of two pilots to the collaborative interaction between a single pilot and automated systems. While existing studies primarily examine technical feasibility and automation improvements, they lack ergonomic analysis of specific operational tasks. This study therefore uses the landing gear retraction process as a case study, comparing three interaction modes: traditional manual operation, voice-only control, and a hybrid interaction approach. Findings indicate that traditional manual operations under SPO are prone to errors due to high workload and lack of redundancy, while voice-only control reduces workload but is susceptible to noise interference and misrecognition risks. Consequently, the study proposes a hybrid interaction solution integrating voice commands with haptic feedback, which employs a dual-verification mechanism to balance efficiency and safety, thereby providing a measurable and iterative interaction design methodology for critical operations in SPO mode.

Keywords: Single-Pilot Operations (SPO); Human-computer interaction; Voice; Tactile; Landing gear retraction

1 引言

1.1 发展现状

目前国际关于SPO模式系统的研究呈现技术探索与监管制约并行的态势。空客与国泰航空合作的“A350 Project Connect”项目聚焦eMCO模式，计划在长途航班巡航阶段实现单人操作，原定2025年启用，但因飞行员失能监测、紧急接管等安全验证未达标而推迟。霍尼韦尔在欧盟SESAR3项目资助下开发“达尔文”AI数字助理，集成眼动追踪与生理指标监测技术，构建人机协作决策框架以支持SPO，目标2026年完成测试并分阶段扩展至全航段。德国汉莎航空虽曾开展可行性研究，但因无法达到安全目标终止。监管层面，欧洲航空安全局在2025年6月的报告中明确暂停SPO研究，并指出五大问题，飞行员失能实时监测、疲劳管理机制、轮休唤醒后的睡眠惰性、交叉检查缺失及生理需求应对，强调需优先开发“智能驾驶舱”技术，并在双人制中验证成熟后再考虑SPO应用[1,2]。

1.2 优势与缺陷

随着航空运输业的持续增长与运营成本压力的不断增大，单飞行员操作SPO模式因其在降低人力成本和缓解飞行员资源紧张等方面的巨大潜力，已成为未来民用航空发展的重要趋势和研究热点[3]。该模式的主要挑战在于，原本由两名飞行员共同承担的飞行管理、决策制定、情境监控和应急响应等复杂职责，将很大程度上转移至单个飞行员与高度自动化系统及人工智能AI代理的协同交互上，这意味着飞行员与机载系统之间的人机交互质量将直接决定飞行的安全性和效率。SPO模式下，高频、关键和高负荷情境中飞行员行为的合理性与流畅性至关重要。不合理的交互设计可能导致飞行员情境意识下降、操作失误率上升，甚至诱发灾难性后果[4]。

目前，大量实验探讨了SPO的技术可行性、安全风险和经济性。研究普遍认为，实现安全可靠的SPO，关键在于提升自动化系统的智能化水平，进而调整人机协作关系，并确保飞行员在驾驶舱环境中拥有监控和接管能力。在交互技术层面，研究聚焦于新型交互模态，如语音识别与控制、手势

交互、眼动追踪、脑机接口等，以及增强或混合现实平视显示、自适应界面等。这些技术旨在提供更自然、直观且具备情境感知能力的信息呈现和操作方式，增强飞行员的空间认知。例如，眼动追踪可用于意图识别和注意力管理，AR可叠加关键信息于真实视野。系统运用多种方法分析飞行员行为，包括任务分析、认知工作负荷评估、情境意识测量（SAGAT）、失误分析与分类（HFACS），以及利用飞行模拟器进行仿真环境下的测试。计算建模也被用于预测飞行员在特定界面和任务下的表现。人因工程学原则始终是驾驶舱设计的核心。针对自动化带来的新问题，研究提出了设计改进建议，如状态透明化、模式通告清晰化、提供操作解释等。

然而，聚焦于SPO模式下飞行员典型行为动作本身的分析与研究仍显不足，现有研究多关注任务层面或认知层面的成果，对构成任务的基本操作动作，如特定旋钮的旋转角度、触摸屏滑动的轨迹、语音命令的措辞等动作的系统性研究相对缺乏[4]。许多交互设计研究仍基于传统双人制驾驶舱或通用HMI原则，未充分考虑SPO模式下飞行员角色转变、潜在的高压力或高负荷情境以及单人操作时动作效率与可靠性的重要程度。如何定量化地评估一个动作设计的优劣，并基于评估结果进行迭代优化，缺乏成熟且专门针对航空复杂交互动作的方法论和工具链。本文研究旨在基于SPO模式下提出了飞机起落架收放流程优化方法，提升起降阶段的操作效率与安全性。

2 传统交互方案

本文以民用航空典型关键操作起落架收放为研究对象，识别SPO模式下传统操作流程的潜在风险点，进而提出具有实时可能性的交互方案。本文系统的评估了传统手动、语音与混合交互三种单一的交互模式的适用性。

2.1 传统飞行员手动收起

在面向SPO模式下飞行员人机交互操作典型行为动作优化设计研究中，传统双人制起落架收放操作模式，即依赖手动操作、参数目视确认及副驾驶

交叉检查，因SPO场景的结构性变化暴露显著局限性。工作负荷激增方面，飞行员需独立处理导航、通信与系统监控多任务，手动操作起落架极易导致关键注意力分散。典型案例为2018年波音737-800在孟买机场因塔台通信干扰延误起落架操作，致使飞机冲出跑道，二次校验缺失则使误触风险加剧[4]。

2.2 语音操控

在SPO模式下飞行员人机交互操作典型行为动作优化设计研究中，语音控制作为替代方案因其潜力受到关注，其核心优势在于显著降低操作负荷，使飞行员能更聚焦于飞行状态监控。例如在飞机牵引车与飞机对接过程中，语音指令可替代传统多人协作的手势和无线电通信，减少飞行员在复杂地面操作中的注意力分散[5]。同时，更迅速的响应速度可实现关键指令的即时执行，如现代MBUX语音系统在汽车领域已证明可通过自然语言处理实现悬架调整和温度控制等操作的毫秒级响应，类比到航空领域可优化起落架收放时机。此外其与AI副驾驶的协同潜力可提升安全性，例如梅赛德斯MBUX系统基于驾驶员习惯建立个性化档案，自动触发座椅加热等操作，若应用于航空场景，AI副驾驶可自动核查起落架状态参数与指令逻辑的一致性[6]。

现有语音技术存在待解决的关键问题，环境噪声干扰方面，引擎和告警提示音易掩盖语音指令，上海交通大学研究团队采用Mel倒谱特征顺序统计滤波算法结合基音检测，有效抑制噪声干扰。指令歧义主要体现于词误识别，如“收起落架”可能被误判为“收襟翼”，此类错误在语音指令集设计缺陷时尤为突出，同时，系统缺乏二次检查机制误识别指令可能被直接执行[7]。加拿大海军CH-148“旋风”直升机事故即为典型案例，自动驾驶系统在急转弯时累积姿态指令偏差并锁定操控权，导致飞行员无法接管而坠海，凸显权限管理失效的灾难性后果。

3 混合式交互方案

3.1 设计方案

在面向SPO模式下飞行员人机交互操作典型行

为动作优化设计研究中，传统手动操作与纯语音交互各自存在结构性缺陷。前者在单飞行员场景下因二次校验缺失易诱发操作延误，后者受环境干扰与指令歧义制约可能引发误执行风险，二者皆难以独立满足SPO模式对效率与可靠性的双重需求。基于此矛盾本质，本文提出“语音-触觉混合指令为核心层、传统手动操作为物理备份层、纯语音操控为效率辅助层”的融合交互方案，其核心在于打破交互模式的静态割裂，通过情境感知机制实现智能切换[8]。当执行起落架收放等安全关键操作时，系统自动启用语音-触觉混合模式，以触觉振动反馈构筑完成操作指令确认，如遭遇系统失效或极端湍流，则切换至传统手动模式保留其物理操作的终极控制权；而在巡航阶段执行灯光调节等低风险任务时，系统开放纯语音通道以最大化操作效率。这种分层融合机制使三者形成互补协同，语音-触觉层通过多模态校验弥补手动操作的速度短板，传统手动层为语音系统提供失效容错基础，纯语音层则释放常规任务负荷，最终在SPO人机闭环中达成“关键操作防错、常规任务提效、异常场景可控”的人因工程目标。

该方案通过动态情境适配引擎实现模式优化：持续监测环境湍流强度、系统健康度及飞行员眼动负荷指数，当参数超过阈值（如风切变预警或注意力分散）时，自动将纯语音模式升级为语音-触觉混合操作，同时锁定传统手动通道作为应急备份。反之在平稳状态下，则降级纯语音以减轻认知负荷。通过智能化的交互权重分配，单一飞行员在复杂任务中同时兼顾操作精准性与态势感知连续性，为SPO人机协作范式提供理论重构路径。

3.2 方案分析

以2021年某航司空客A320事故为例，当飞机放出起落架后触发减震器与前轮转弯故障警告时，机组未遵守《空客A320快速参考手册》中“系统重置表”的规定，该手册明确限定重置操作必须严格按列表执行，禁止自主选择电门。由于错误重置“防滞&前轮转弯”电门导致前轮偏转90度，

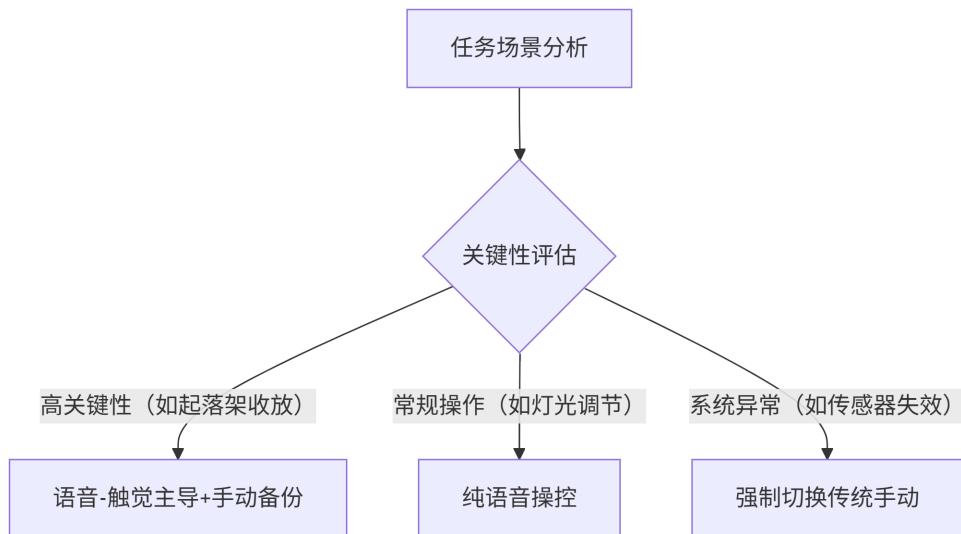


图1. SPO混合式人机交互方案

此违规操作违反了SOP程序[9]。而在单一飞行员驾驶系统中,由于传统模式下的人机交互缺乏二次验证,有较高出现指令误判但依旧执行的事件风险。所以本文提出了物理反馈加语音重复指令的方案以来达到二次检验的作用,如当飞行员发出“收起落架”指令时,系统复述指令“确认收起落架”,同时在驾驶杆施加持续三秒的触觉振动,形成物理感知信号。飞行员需在2秒内轻握驾驶杆压力传感器或按压油门杆确认按钮完成确认闭环,该设计将误操作屏障由单一听觉通道扩展至“听觉-触觉-力觉”多通道协同。

4 总结

本研究聚焦单飞行员操作(SPO)模式下起落架收放流程的交互优化问题,通过对比传统手动操作、纯语音控制及混合交互(语音+触觉反馈)三种模式,分析其在效率、安全性和人因工效学方面的表现。采用实验模拟与理论分析相结合的方法,收集了飞行员操作响应时间、错误率及情境意识数据。研究发现,传统手动模式在SPO环境下因高负荷和冗余缺失导致操作风险上升,纯语音控制虽提升效率但易受噪声干扰,而混合交互通过语音指令与触觉反馈的双重验证机

制,在保证操作速度的同时显著降低误操作率。未来,随着人工智能与自适应界面的发展,SPO系统可能向更智能的协同决策方向发展,例如结合生物特征识别实现更自然的交互。此外,需探索不同文化背景下的语音指令标准化,并研究极端情境下的交互鲁棒性,以推动SPO技术的实际应用。

参考文献

- [1] Comerford D, Brandt SL, Lachter JB, et al. NASA's single-pilot operations technical interchange meeting: proceedings and findings. Technical Interchange Meeting. 2013 (ARC-EDAA-TN8313).
- [2] 王森, 肖刚, 王国庆. 单一飞行员驾驶模式技术[J]. 航空学报, 2020, 41(4): 323541.
- [3] 学喆, 张岳, 陈军. 无人-有人机混合主动式交互决策研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(05): 44-52.
- [4] 丁冬进. 商用飞机双人制和单人制系统模型构建研究[D]. 上海: 上海交通大学航空航天学院, 2022.
- [5] 庞学欣. 一种基于语音和视觉结合的飞机牵引车智能驾驶控制系统[P]. 中国专利, CN202010118624.9. 2020.02.26.
- [6] 王文娟. 一种机载语音信号控制系统的设计与实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.

- [7] 熊端琴, 姚乃明, 林榕, 等. 面向飞行交互任务的三种人机交互方式效率比较研究[J]. 航天医学与医学工程, 2020, 35(3): 156-161.
- [8] 黄文博, 王长元, 贾宏博, 等. 多通道数据融合的飞行员操作意图分析与触觉反馈技术[J]. 西安工业大学学报, 2022, 42(2): 187-187.
- [9] 丁文珂. 基于层次分析法的人机界面综合评价研究[D]. 郑州: 河南大学, 2008.

Copyright © 2025 by author(s) and Global Science Publishing Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access