

人为因素适航验证创新实验设计与实践

盛浩 刘原池

中国民用航空飞行学院 航空工程学院, 中国·四川 广汉 618307

摘要: 开展人为因素适航验证创新实验是飞行器适航技术专业本科生巩固拓展专业知识、塑造综合素质与提升工程实践能力的重要手段。为此, 构建了面向复飞的人为因素适航验证创新实验项目。首先分析运输类飞机人为因素适航要求; 然后基于人为因素适航要求, 以机组复飞为实验对象, 构建面向适航验证的复飞场景, 并从“人—机—环境”系统角度生成机组复飞绩效适航评测指标体系; 最后基于复飞场景和绩效评测指标, 设计人为因素适航验证创新实验方案及具体流程, 并开展应用验证。实践结果表明主客观数据融合的机组复飞绩效适航评测充分体现了人为因素适航验证过程, 有力支撑了飞行器适航技术专业建设。

关键词: 实验设计; 复飞; 绩效评测; 模拟机实验

Innovative Experimental Design and Practice for Human Factors Airworthiness Verification

Hao Sheng Yuanchi Liu

College of Aviation Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan, Sichuan, 618307, China

Abstract: The innovative experiment for human factors airworthiness verification is an important means for undergraduate students in aircraft airworthiness technology to consolidate and expand their professional knowledge, enhance their comprehensive quality, and improve their engineering practice ability. To this end, an innovative experimental project on human factors airworthiness verification for go-around was developed. Firstly, the human factors airworthiness requirements for transport aircraft were analyzed. Based on these requirements, the go-around scenario was constructed with the flight crew as the experimental object, and the airworthiness evaluation index system for the crew's go-around performance was generated from the perspective of the "human-machine-environment" system. Finally, the innovative experimental program for human factors airworthiness verification was designed based on the go-around scenario and performance evaluation indices, and the specific process was carried out. The project execution results show that the airworthiness evaluation of the crew's go-around performance, based on the integration of subjective and objective data, fully reflected the process of human factors airworthiness verification and strongly supported the development of the aircraft airworthiness technology specialization.

Keywords: experimental design; go-around; performance evaluation; simulator experiment

0 前言

人为因素已被广泛认为是现代民航事故的主要成因之一。人为因素适航验证也成为运输类飞机型号合格审定中不可或缺的环节。人为因素适航验证是通过实验验证飞机驾驶舱人机界面设计和运行环境是否匹配, 人为差错管理是否有效的过程, 是从根本上提升飞行安全的主要手段。在这一过程中, 机组绩效作为人为因素适航的核心判断依据, 科学准确地评测机组绩效成为飞行器适航技术专业复合型人才需要掌握的核心能力之一。人为因素适航验证创新实验项目, 旨在从适航规章、条款出发, 明确人为因素适航条款的符合性验证方法, 进而设计实验大纲, 组织实施实验, 采集数据, 编制符合性报告, 从而系统培养飞行器适航技术专业学生的适航工程技术与管理能力。因此, 开展人为因素适航验证创新实验设计与实践对于培养满足行业发展需求的飞行器适航技术专业复合型人才具有重要意义。

近年来, 围绕教育部高质量专业建设要求及高校推动

科研与教学深度融合使命, 从实验内容、平台构建等角度展开创新实验项目设计与实践成为专业人才培养质量提升的重要手段。在实验内容设计方面, 王海珍等^[1]设计了基于过渡金属硫化物的创新实验, 涵盖材料表征、存储器件制备等多个环节, 培养了学生跨学科科研能力。韩金娥等^[2]基于绿色化学理念, 设计光催化反应综合实验, 通过丰富的层次实验激发了学生的科学探究兴趣。在实验平台构建方面, 霍鑫等^[3]开发的模拟飞行实验平台, 实现了三自由度姿态模拟, 并预留接口支持学生自主设计实验。陈晓红等^[4]设计了模块化多构型机器人平台, 可满足多种构型及传感器的实验需求, 显著提升了教学实验的扩展性。在学科交叉与技术融合方面, 唐琳等^[5]构建了人工智能算法在能谱测量中的应用实验, 为学生提供了挑战性实验实践。路宏遥等^[6]将热成像技术引入轨道裂缝检测实验, 设计了贯穿理论、建模与工程实践的教学方案。

综上所述, 创新实验项目的开展在塑造专业人才综合

素质方面效果显著。飞行器适航技术是“适航验证技术+适航工程管理”的复合型人才培养专业，迫切需要结合行业发展通过创新实验项目赋予专业人才核心能力，并塑造专业品牌，而人为因素适航验证已成为运输类飞机适航验证领域的重点内容。开展人为因素适航验证创新实验项目能够为飞行器适航技术专业复合型人才培养和专业提档升级提供有力支撑。为此，论文首先梳理运输类飞机人为因素适航要求，参考相关咨询通告建立符合性验证方法。然后以机组复飞任务为对象，设计面向适航的机组绩效适航评测创新实验项目，并开展应用。

1 人为因素适航

1.1 人为因素适航要求

适航要求是开展人为因素适航验证活动的依据。运输类飞机适航标准 CCAR-25 中散布了关于飞机驾驶舱操控器件、显示和告警等典型与人相关的适航条款。局方制定了针对 25 部飞机的专用人为因素适航条款 25.1302，相关人为因素适航要求及其符合性验证方法总结如图 1 所示。以 25.1302、25.1523 为核心^[7]，包含操控器件、信息显示和机组工作负荷等具体要求。例如，操控器件的适航要求包括 25.771 (a)、25.771 (c) 和 25.777 (b) 条款，要求器件标识清晰、可达和反馈充分，符合性验证方法为 MOC1、MOC2 和 MOC5。相关咨询通告提供了具体的符合性验证指导。

1.2 面向人为因素适航验证的复飞场景

复飞是指在飞机进近中，当机组发现不具备着陆条件时，中断进近，并按机型的复飞操作规定和程序上升到指定高度的过程。该过程体现了“人一机一环”系统交互全过程，从机组感知到决策再到行动，涵盖了信息获取与整合、态势感知与评估、任务分配与决策支持，以及飞行操纵等多个环节。在复飞过程中，机组需确保操控器件和信息显示的清晰、

可达与可用。同时，机长通常负责飞行操纵，副驾驶负责监控飞行参数与任务管理。此过程能充分验证任务分配的合理性、工作负荷的均衡性及系统对任务分配的支持能力。

在“人一机一环”系统框架下，复飞场景涉及多个动态要素，包括机组状态、飞机因素、环境条件以及任务执行过程，如图 2 所示。这些要素相互作用，共同影响机组在复飞过程中的绩效表现。基于上述分析，以复飞这一动态的飞行任务过程为验证对象能够全面覆盖人为因素适航条款 25.1302 与 25.1523，而复飞过程中的机组绩效评测则能够充分验证人为因素设计。

1.3 机组复飞绩效适航评测

根据面向复飞的人为因素适航验证场景，梳理影响机组绩效的因素，充分利用当前主客观数据融合的人为因素测量研究成果^[8,9]，构建了机组复飞绩效适航评测指标体系及其度量方法，如图 3 所示。参考民航驾驶舱中人的绩效研究^[10]，机组复飞绩效划分为任务绩效、工作负荷、情景意识、机组协作 4 个维度。任务绩效通过复飞决策反应时间、复飞航迹来度量。研究表明，较短的反应时间和较小的航迹偏离量可以作为任务完成质量的有效衡量^[11]。工作负荷度量结合了生理数据和主观量表分析，通过心率、心率变异性等生理指标捕捉机组在任务环境下的工作负荷变化，同时采用 NASA-TLX 量表对机组的主观工作负荷进行评价。研究表明，生理数据的实时监控与主观评分结合能够更有效提高工作负荷评估的准确性与信效度^[12,13]。情景意识通过 SART 量表、压力应激量表 (SRQ)、面部活动单元 (AU) 的动态检测进行量化。SART 量表能够有效评估机组对飞行环境、设备状态和任务进展的掌控水平^[14]，而 AU 的分析可捕捉机组在复杂情境中的认知负荷和情绪状态^[15]。机组协作则主要通过协作效率和决策一致性等行为指标评测，同时结合专家评分对协作质量进行主观评价。研究表明，任务复杂性和时间压力的增加会显著影响机组协作效率与一致性^[16]。

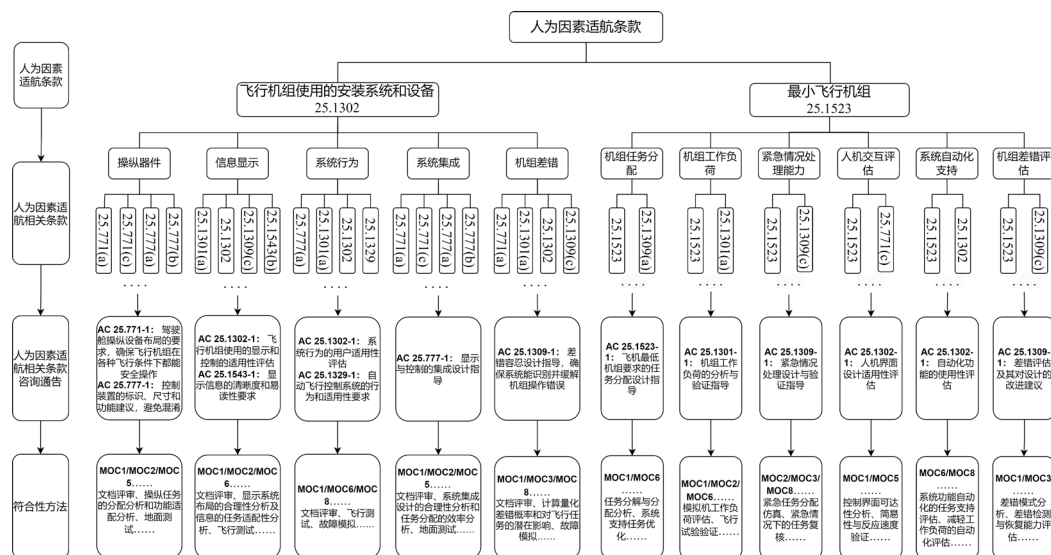


图 1 人为因素适航要求

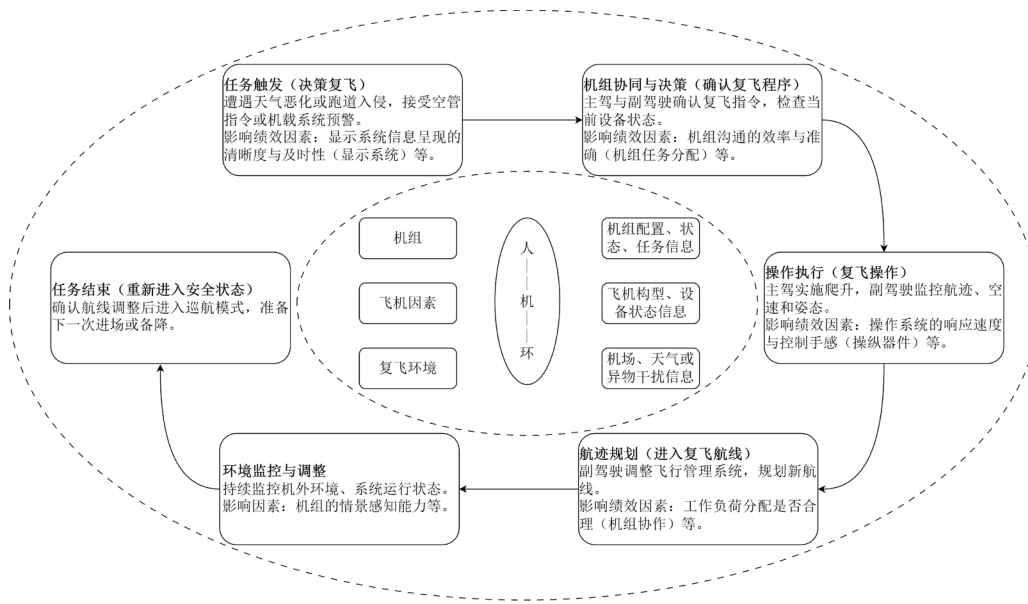


图 2 复飞适航验证场景

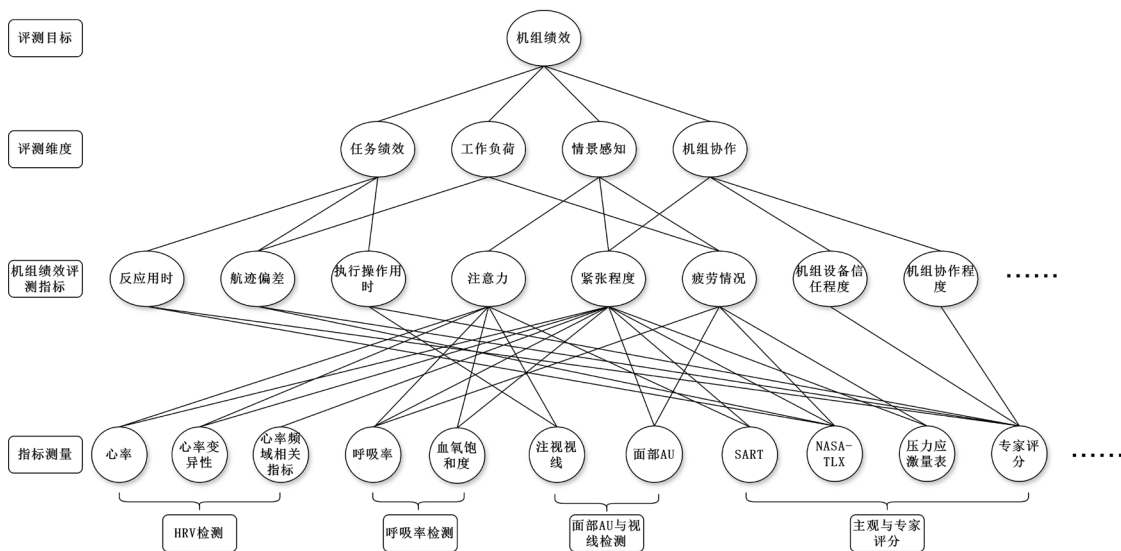


图 3 机组复飞绩效适航评测指标体系

2 基于复飞场景的机组绩效评测创新实验设计

2.1 实验框架

人为因素适航创新实验项目需要赋予飞行器适航技术专业学生的人为因素适航要求提取，符合性验证方法筛选，实验验证方案设计，符合性报告生成等系统的适航技术与管理能力。基于该目标，利用上述的复飞场景和机组绩效适航评测指标体系构建了创新实验项目框架，如图 4 所示。实验准备阶段通过面向适航验证的复飞场景构建，确立机组绩效评测指标体系，并设计符合适航验证要求的机组绩效评测方案，充分训练学生适航要求提取、符合性验证方法筛选能力。在实验程序与数据采集阶段，学生组织管理复飞任务，并在进近阶段设置触发事件。对执行复飞任务的被试机组使用

1080P 单目摄像头采集面部视频序列，并组织其在完成复飞操作后进行主观问卷调查与专家评分。该阶段能够反映学生实验组织与管理能力。在数据处理阶段，学生使用采集到的初始数据，提取生理类数据，并整理主观调查结果，按照模板形成实验报告。该过程能够训练学生的数据处理与分析能力。综上，该创新实验项目框架能够帮助学生理解适航验证实验设计的理论与实践逻辑，通过数据驱动的实验方法赋予其将适航要求转化为科学验证过程的能力。

与以往的人为因素适航验证实验不同之处在于该实验框架的生理数据采集基于单目摄像头采集的被试面部视频提取，无侵入式的采集方式确保了对“人—机—环”系统交互的最小干扰，并显著降低了实验成本，有助于实验的广泛开展。

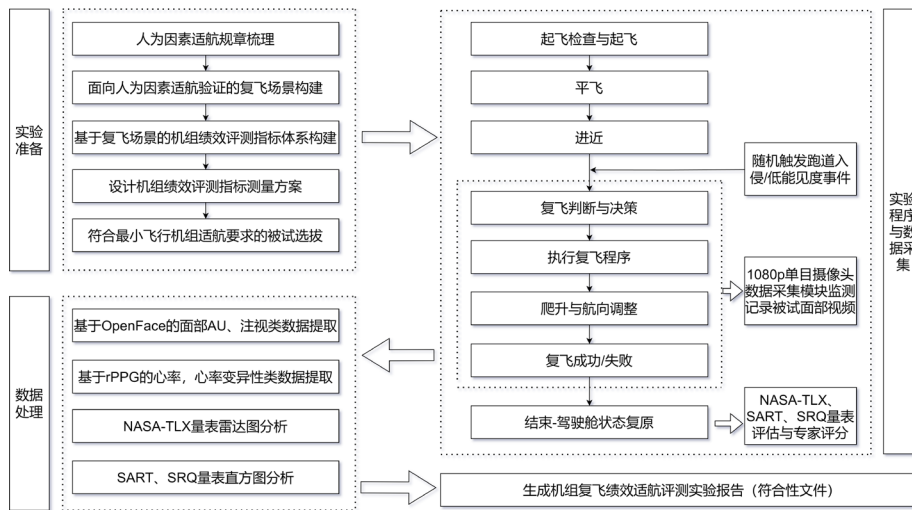


图 4 人为因素适航验证创新实验项目框架

2.2 实验方案

2.2.1 实验人员选拔

参考运输类飞机如 ARJ21 和 C919 飞机的人为因素适航验证实践，飞行器适航技术专业学生（实验管理人员）选拔 14 名优秀飞行学员组成 7 组机组，所有飞行学员均在新舟 600 飞机上进行高教机训练。实验机组成员轮流担任主、副驾驶角色，以消除系统性偏差。此外，特邀 3 名资深飞行教员（飞行时长超过 5000 小时）负责任务质量评分。

2.2.2 实验设备

参考 CCAR-60 部要求，实验选用 MA600 FFS 模拟机作为主要实验设备。该模拟机为全动飞行模拟器，认证等级达到 C 级，已通过 CAAC 及国际飞行训练设备标准认证，具有与真实航空器一致的驾驶舱设备及飞行程序。

被试机组的面部视频采集设备为 1080P 单目摄像头模块。

2.2.3 实验流程

首先，实验管理人员检查实验数据采集设备状态，向被试机组提示实验与记录开始，飞行教员设置模拟机初始状态。随后，被试机组进行起飞检查与起飞，完成爬升后进行平飞，接着进入进近阶段。此时触发跑道入侵或低能见度事件，由被试机组自行决断复飞。若复飞成功，结束实验并复原驾驶舱状态。若复飞失败，实验在飞行教员干预后结束，

并复原驾驶舱状态。实验完成后，被试机组到讲评室逐一完成 NASA-TLX 量表、SART 和 SRQ 填写。飞行教员对被试机组的表现进行评分。最后，实验管理人员对主观量表、飞行教员评分、设备采集的初始数据进行分组标记与存储。

2.2.4 数据处理

基于采集到的初始视频帧，使用 OpenFace 开源程序进行 AU 与注视类数据采集。同时，对机组的面部视频序列划定 ROI 区域，基于远程光电容积技术（rPPG）采集每位机组成员在实验过程中的 BVP 信号，进一步计算心率等生理数据。采样频率为 0.05~150Hz。

主观调查数据依据数据特征选用雷达图或直方图的形式整理表示。

3 创新实验开展与成效

以中国民用航空飞行学院 2021 届飞行器适航技术专业本科生开展的人为因素适航验证创新实验项目为例，展示实验过程。飞行器适航技术专业本科生作为实验管理人员，利用该校充足的飞行学员与飞行教员资源，选拔 14 名高教机飞行阶段的飞行学员作为被试。14 名被试按照主、副驾搭配为 7 组被试机组，每组被试机组依次进行复飞实验，实验完成后交换主副驾角色后继续进行实验。依次进行 7 组被试机组的复飞实验，采集初始实验数据、主观调查数据与飞行教员评分，实验场景如图 5 所示。



图 5 实验场景图

基于被试机组的初始面部视频数据以及 NASA-TLX、SART、SRQ 量表和飞行教员评分数据,使用 OpenFace 提取 AU 及其强度、注视类等生理数据,利用 rPPG 技术提取心率等生理数据。整理分析主观量表数据。基于实验数据和前述的实验设计,制定满足适航符合性文件要求的实验报告模板。

2022 年至今,该创新实验项目已在三届飞行器适航技术专业人才培养中实施,在实验过程中,学生以人为因素适航规章为基础,完成场景构建,并基于所构建的场景实施机组绩效评测指标的采集方案和实验数据的处理。通过这一系统性实践训练,飞行器适航技术专业本科生初步掌握了适航验证技术与管理能力,并在实验过程中激发了对人为因素适航的浓厚兴趣。该专业毕业生已在中国商飞、中国通飞及无人机领域从事人为因素适航相关工作,塑造了专业品牌。累计三届共 100 余名学生参与该创新实验项目,为飞行器适航技术专业课程设计提供了有力支撑。

4 结语

论文系统梳理了运输类飞机的人为因素适航要求。基于适航要求,以复飞这一动态任务过程为研究对象,构建面向复飞的人为因素适航验证场景,依据场景建立了机组绩效评测指标体系与度量方案,进而设计了人为因素适航验证创新项目并应用于飞行器适航技术专业人才培养。实践结果表明:飞行器适航技术专业本科生能够在实验过程中掌握适航思维,初步具备适航验证技术与管理能力,为学生从事相关工作,塑造飞行器适航技术专业品牌奠定了坚实基础。

参考文献:

- [1] 王海珍,赵斐,李德慧.基于过渡金属硫化物的存储器研究型创新实验设计[J].实验技术与管理,2023,40(7):14-19.
- [2] 韩金娥,钮腾飞.基于绿色化学的烯炔 Meerwein 水合反应创新综合实验设计[J].化学教育(中英文),2024,45(18):61-68.
- [3] 霍鑫,岳明潭,弭宝涵,等.自动化专业实验创新平台设计与教学研究[J].实验室研究与探索,2024,43(6):42-46.
- [4] 陈晓红,柏龙,孙园喜,等.多构型移动机器人创新实验平台设计[J].实验室研究与探索,2022,41(6):117-121.
- [5] 唐琳,施开波,刘星月,等.基于成果转化的人工智能算法创新型实验设计[J].实验室研究与探索,2024,43(5):144-148.
- [6] 路宏遥,何越磊,李再伟.基于热成像技术的无砟轨道裂缝检测创新实验设计与应用[J].实验室研究与探索,2023,42(2):187-191.
- [7] 宋海靖,焦毅,胡毅.民用飞机试飞阶段人为因素适航审定技术研究[J].航空工程进展,2016,7(4):484-488.
- [8] 张奇良,杨坤华,曲行达,等.基于多模态生理信号的驾驶人脑力负荷评估[J].深圳大学学报理工版,2022,39(3):278-286.
- [9] 明东,柯余峰,何峰,等.基于生理信号的脑力负荷检测及自适应自动化系统研究:40 年回顾与最新进展[J].电子测量与仪器学报,2015,29(1):1-13.
- [10] Don H. Human performance on the flight deck[M]. CRC Press,2016.
- [11] Endsley M R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems[Z]. Human factors,1995:32-64
- [12] Wilson G F. An analysis of mental workload in pilots during flight using multiple psychophysiological measures[J]. The International Journal of Aviation Psychology,2002,12(1):3-18.
- [13] Li Volsi G, Monte I P, Aruta A, et al. Heart rate variability indices of student pilots undergo modifications during flight training[J]. Aerospace Medicine and Human Performance,2023,94(11):835-842.
- [14] Endsley M R. Situation awareness[J]. Handbook of human factors,2021:434-455.
- [15] 胡敏,胡鹏远,葛鹏,等.基于面部运动单元和时序注意力的视频表情识别方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2023,35(1):108-117.
- [16] Salas E, Sims D E, Burke C S. Is there a "big five" in teamwork?[J]. Small group research,2005,36(5):555-599.

作者简介:盛浩(2000-),男,中国河南南阳人,硕士,从事人因工程研究。

基金项目:四川省高等教育人才培养质量和教学改革重大项目(项目编号:JG2023-38),民航飞行技术与飞行安全重点实验室自主研究项目(项目编号:FZ2022ZZ01)。