

未来商用飞机智能无人驾驶模式设计与分析

李知霖

清澜山学校, 中国·广东 东莞 523808

摘要: NASA 在 2013 年指出, 未来商用飞机的发展方向之一为智能无人驾驶, 其中商用飞机远程驾驶 (RPO) 模式是智能无人驾驶发展方向之一。本文提出了一种智能无人驾驶 (U-AD) 方案, 与无人驾驶远程操控 (U-RPO)、无人驾驶有人监控 (U-HM) 方案进行了对比分析, 剖析了智能驾驶与无人驾驶模式的技术、协同机制及应用优势。结果表明智能无人驾驶模式能提升航空运营效率与飞行安全性, 有望为航空业发展提供新的解决方案。

关键词: 商用飞机远程驾驶 (RPO); 单人驾驶 (SPO); 智能驾驶; 无人驾驶; 协同机制

Design and Analysis of Intelligent Unmanned Driving Mode for Future Commercial Aircraft

Li Zhilin

Qinglan Mountain School, China Guangdong Dongguan 523808

Abstract: In 2013, NASA pointed out that one of the development directions of future commercial aircraft is intelligent unmanned driving, among which the remote piloting of aircraft (RPO) mode is one of the development directions of intelligent unmanned driving. This paper proposes an intelligent unmanned driving (U-AD) scheme and compares and analyzes it with the unmanned remote control (U-RPO) and unmanned manned monitoring (U-HM) schemes, dissecting the technology, coordination mechanism and application advantages of intelligent driving and unmanned driving modes. The results show that the intelligent unmanned driving mode can improve the operational efficiency and flight safety of aviation, and is expected to provide new solutions for the development of the aviation industry.

Keywords: Remote piloting of aircraft (RPO); Single-pilot operation (SPO); Intelligent driving; Unmanned driving; Coordination mechanism

0 引言

随着全球民用航空客运量的持续增长和航空物流的快速扩张, 市场对飞行员的需求日益迫切。空客预计, 未来 20 年中国市场需要 12.4 万名新飞行员, 人才缺口巨大^[1]。然而, 飞行员培养存在成本高、时间长的问题。传统民用航空器的机组配置已从五人制演进为双人制, 但双人制模式在应对飞行操作、环境监测、决策协作等任务时, 仍面临人力成本高、响应时间有限等挑战。在此背景下, 商用飞机远程驾驶 (RPO) 模式作为融合机载自动、自主系统、远程地面机组与空中交通管制多方协作的新型驾驶模式, 成为解决行业痛点的重要方向, 其研究与应用对提升航空运营效率、保障飞行安全具有重要意义^[2]。

NASA 在 2013 年便指出, 未来商用飞机的发展方向之一为智能无人驾驶, 其中商用飞机远程驾驶 (RPO) 模式是智能无人驾驶发展方向之一。近年来, 商用飞机驾驶模式的创新研究受到广泛关注。早期研究聚焦于飞机配置的优化, 包括飞行操作、环境监测、决策协作及应急替代等。随着技术发展, 航司在追求经济性方案的过程中, 单

飞行员操作 (SPO) 模式成为过渡阶段的研究重点, 为远程驾驶模式奠定了基础^[3]。

针对远程驾驶模式 (RPO), 现有研究已构建了商用远程驾驶飞机系统的组织架构, 明确了远程地面机组、地面站、指令与控制链路、空管通信、探测与规避及空中交通管理等核心组成部分^[4]。其中, 远程地面机组由远程飞行员、调度员及备用远程飞行员组成, 通过地面站实现对飞机的远程操控并保障空地数据传输, 机载自动系统则承担环境感知、状态管理及自主飞行等任务, 减少远程飞行员的工作负荷^[5]。

在决策模式方面, 研究提出了基于飞行类型和远程飞行员状态 (失能等) 的空地协同决策场景, 通过动态调整控制权分配, 实现与双人制操作相当的安全水平。此外, 以机场场面运行为例的对比分析表明, RPO 模式在操作覆盖度上可基本覆盖双人制模式, 并能将飞行前检查的响应时间缩短 48%, 显著提升操作效率。这些研究为商用飞机智能驾驶与无人驾驶模式的发展提供了理论与实践基础, 但在复杂空域融合、极端场景应对等方面仍需进一步探索。

本文旨在分析商用飞机智能驾驶与无人驾驶模式的技术、协同机制及应用优势, 聚焦不同形式的智能化无人驾驶。具体而言, 提出了一种智能无人驾驶 (U-AD) 方案, 并与无人驾驶远程操控 (U-RPO)、无人驾驶有人监控 (U-HM) 方案进行了对比分析, 剖析了智能驾驶与无人驾驶模式的技术、协同机制及应用优势, 结果表明智能无人驾驶模式能提升航空运营效率与飞行安全性, 有望为航空业发展提供新的解决方案。

1 无人驾驶远程操控 (U-RPO)、无人驾驶有人监控 (U-HM) 方案

1.1 地面有人远程操控的无人驾驶商用飞机

1.1.1 方案框架

选用民用飞机进行改装, 着重强化飞机与地面控制中心间的通信及协同操控能力。飞机配备高性能的卫星通信模块, 支持超视距数据传输, 确保在全球任何空域都能与地面控制站保持稳定连接, 保障操控指令的实时性。同时, 在飞机关键部位如机翼、机身和起落架安装多种传感器, 用于监测飞行中的物理参数, 这些传感器数据实时回传至地面, 辅助地面操控人员进行决策。

地面控制站同时呈现飞机飞行状态、航行情报、周边空域态势等信息。模拟场景涵盖常见的复杂飞行状况, 如在繁忙空域中与其他飞机的间隔保持、遭遇恶劣天气时的飞行应对, 以及模拟通信信号部分丢失或受到干扰时的应急处置等。

1.1.2 实验方法

实验全程由地面操控人员主导, 流程如下:

(1) 飞行前准备: 地面操控人员在控制站对飞机各系统进行全面远程自检。确认飞机状态正常后, 根据任务需求, 在地面签派制定详细飞行计划, 并通过 c2 数据链路将飞行计划上传至飞机驾驶系统, 同时向空中交通管制 (ATC) 部门报备, 获取飞行许可。

(2) 飞行过程操控: 起飞阶段, 地面操控人员通过摇杆和按钮精确控制飞机发动机推力、襟翼角度、起落架收放等操作, 使飞机按照预定跑道加速滑跑并顺利起飞。进入巡航阶段, 飞机主要依靠自动驾驶系统保持飞行姿态和航线, 但地面操控人员需时刻监控飞机各项参数及周边空域动态并接收数据。

(3) 评估指标记录: 在整个实验过程中, 详细记录飞机飞行轨迹与预定航线的偏差情况, 精确测量地面操控指令下达至飞机响应的延迟时间, 统计飞机与 ATC 之间信息交互的成功率等关键数据。同时, 对比在相同模拟场景

下, 地面有人远程操控模式与传统有人驾驶模式在飞行安全性、操作便捷性及应对复杂情况能力等方面的差异, 以便全面评估地面有人远程操控的无人驾驶商用飞机的性能表现。

1.2 地面有人监控的自动驾驶飞行

1.2.1 方案框架

实验采用符合商用远程驾驶飞机 (CRPA) 系统架构的模拟平台, 该平台需集成远程地面机组、机载自动/自主系统及空地数据链路三大核心模块。机载设备包括高精度传感器 (如 ADS-B、气象雷达) 和数据融合系统, 可实时采集位置、姿态及空域环境信息, 并通过指令与 C2 链路传输至地面站。

地面站配置远程飞行员操作界面、调度员监控平台及备用飞行员应急系统, 参考 CRPA 地面站标准配置。通信系统包括地面 (domestic) 有线网络保障短距通信低延与卫星链路用于跨洋飞行 (ocean) 数据传输。此外, 模拟平台需内置机场场面运行场景模型, 包含虚拟跑道、滑行道及管制交互模块。

1.2.2 实验方法

实验参照机场场面运行流, 设置 nominal flight (如正常滑行、起飞) 与 off-nominal flight (如跑道冲突、设备故障) 两类场景, 每种场景重复 10 次。实验流程如下:

远程飞行员与调度员通过地面站完成飞行前检查, 机载自动系统按 checklist 执行设备自检, 结果经 c2 数据链路传输至塔台;

进入滑行阶段后, 机载自主系统通过 ADS-B 感知周边航空器, 结合地面站指令规划滑行路径, 远程飞行员监控轨迹偏差;

出现 off-nominal flight 情况 (如突发大雾) 时, 系统触发警报, 调度员提供气象数据支持, 远程飞行员在短时间内决策是否接管控制, 备用飞行员待命应对主飞行员失能情况;

记录飞行前检查耗时、干预响应时间及操作覆盖项数, 与双人制模式对比。

2 智能无人驾驶 (U-AD) 方案

2.1 方案框架

基于上述平台改装, 强化机载自主系统功能, 采用激光雷达 (图 1) 搭配上视觉摄像头融合感知, 提升复杂气象下环境识别精度; 搭载改进型决策算法, 支持动态调整航线而无需提前申请^[4]。模拟场景扩展至复杂空域, 包含两机之间的冲突、极端天气 (如雷暴) 及通信中断等突发

表1 自动驾驶飞行方案框架

飞行员状态	Nominal flight	Off-nominal flight
远程飞行员状态正常	机载自动及自主系统执行控制程序以完成飞行任务，远程飞行员仅需监控飞行。 远程飞行员完全掌控飞机并对安全负责，航空公司调度员可同时负责多架飞机的调度。	远程飞行员操控飞机，并在航空公司调度员协助下，与航空公司及空中交通管制员沟通，完成异常飞行任务。 远程飞行员完全掌控飞机并对安全负责，调度员必须提供一对一协助，充当“远程副驾驶”。
远程飞行员失能（被动情况）	机载自动及自主系统执行控制程序以完成飞行任务，远程飞行员仅需监控飞行。 远程飞行员完全掌控飞机并对安全负责，调度员必须提供一对一协助。	备份远程飞行员操控飞机，在航空公司调度员协助下，与航空公司及空中交通管制员沟通，完成异常飞行任务。 备份远程飞行员完全掌控飞机并对安全负责，调度员必须提供一对一协助。
远程飞行员异常（主动情况）	地面监控系统向远程飞行员发出操作异常警告，若恶意操作持续，系统将切断当前远程飞行员控制，机载自动及自主系统执行控制程序以协助备份远程飞行员。 备份远程飞行员完全掌控飞机并对安全负责，调度员必须提供一对一协助。	地面监控系统向远程飞行员发出操作异常警告，若恶意操作持续，系统将切断当前远程飞行员控制，备份远程飞行员操控飞机，在航空公司调度员协助下，与航空公司及空中交通管制员沟通，完成异常飞行任务。 备份远程飞行员完全掌控飞机并对安全负责，调度员必须提供一对一协助。

表 2 智能无人驾驶方案框架

方案类型	实验类型	关键流程阶段	核心交互对象	数据记录重点
2.1 地面有人远程操控地面人员全程主导	地面人员全程主导	1.远程自检 2.签派计划 3.手动起降 4.巡航监控 5.指标记录 6.双人制对比	地面站 飞机 ATC	轨迹偏差、指令延迟、ATC 交互率
2.2 地面有人监控自动驾驶	机载自动系统为主，地面监控干预	1.远程自检 2.自主滑行监控 3.异常接管 4.多角色协作5.效率对比 6.双人制对比	远程监控员 调度员 机载系统	检查耗时、干预响应时间、操作覆盖率
2.3 全自动驾驶	机载系统完全自主	1.系统自检 2.自主规划报备3.实时优化轨迹4.预设程序应急5.模式对比 6.双人制对比	机载系统 ATC 备用链路	航线偏移量、应急响应时间、空管交互成功率

情况。

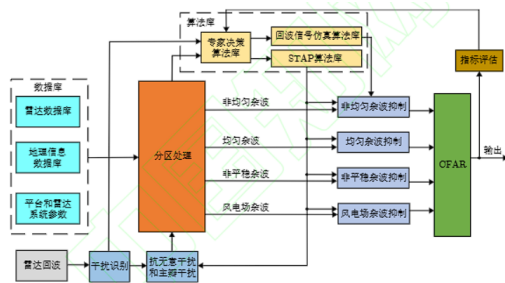


图 1 毫米波雷达工作原理

2.2 实验方法

实验完全脱离人工干预，流程如下：

系统自检后自主生成飞行计划，通过 C2 链路报备 ATC，获得空域授权；

飞行中，机载自主系统每秒融合 10 组环境数据，基于强化学习算法实时优化轨迹；

触发应急场景如链接链路中断时，系统启动预设程序：自动识别最近备降机场，通过 ADS-B 发送应急代码，按场面轨迹运行（STOB）标准完成自主着陆；

记录航线偏移量、应急响应时间及空管信息交互成功率，对比 RPO 模式与双人制在同等场景下的表现。

3 设计方案分析

3.1 技术层面

地面有人远程操控方案技术相对成熟，依托现有民用飞机改装，核心的卫星通信、传感器等技术已有较多实际应用案例，只是在远程协同操控的精细化程度上需进一步打磨，整体离实际商用化距离较近。

地面有人监控的自动驾驶飞行方案，其模拟平台基于 CRPA 系统架构搭建，核心模块的技术有一定积累，但在机载自主系统与地面监控系统的协同、异常场景下的快速响应等方面仍需大量实验验证，技术成熟度处于中等水平。

全自动驾驶方案技术成熟度最低。从技术原理来看,毫米波雷达的优势在于对恶劣环境的强适应性^[6]。它通过发射毫米波信号并接收反射波来探测目标,不受雨、雪、雾、强光等天气或光照条件的影响,能精准测量目标的距离、速度和方位角,即使在低能见度的复杂气象环境中,也能稳定识别周边航空器、障碍物等关键目标,为飞机的避障和航线调整提供基础数据。而视觉雷达(摄像头)则擅长捕捉丰富的环境细节,能够识别交通标志、跑道标线、航空器型号等语义信息,通过图像识别算法理解场景内容,比如判断前方飞机的飞行姿态、识别机场地面的滑行引导线等,为机载系统提供更具场景化的决策依据。

3.2 适用场景

地面有人远程操控方案适用于对安全性要求极高、飞行场景相对固定的商用飞行,比如短途货运航线。地面操控人员能根据固定航线的特点制定精准操控策略,应对可能出现的常见问题。

地面有人监控的自动驾驶飞行方案更适合中长途客运或货运航线,在正常飞行阶段可依靠自动驾驶提高效率,遇到如航线周边空域繁忙、天气变化等情况时,地面人员能及时干预,兼顾效率与安全。

全自动驾驶方案目前更适合在封闭或半封闭的空域进行试验性飞行,如特定的物流园区内短途运输,在完全开放、复杂多变的公共空域中应用风险过高,暂不适合大规模商用。

3.3 方案对比分析

3.3.1 地面有人远程操控的无人驾驶商用飞机方案

优点:该方案对现有民用飞机改装即可实现,技术落地难度较低,能充分利用地面操控人员的驾驶经验。通过高性能卫星通信模块和多种传感器,可实现全球空域的稳定连接与实时数据回传,地面控制站能全面呈现飞行相关信息,让操控人员及时掌握飞行状态,在复杂场景下可凭借人工决策应对突发状况,安全性较有保障。在与传统有人驾驶模式的对比中,能清晰体现其在特定场景下的操作差异,便于优化改进。

缺点:全程依赖地面操控人员,对人员的专业素养和反应能力要求极高,长时间操控易出现疲劳,可能影响飞行安全。飞行过程中,操控指令的传输延迟虽在努力控制,但仍可能在紧急情况下造成风险。且该方案需要大量的人力投入,每架飞机可能需要专属的操控团队,运营成本较高。此外,在通信信号受到严重干扰或丢失时,尽管有应急处置模拟,但实际应对能力仍存疑。

3.3.2 地面有人监控的自动驾驶飞行方案

优点:采用符合 CRPA 系统架构的模拟平台,集成了三大核心模块,技术体系较为完善。在正常飞行场景下,由机载自动及自主系统执行控制程序,地面人员仅需监控,能提高运营效率,一名调度员可协助多架飞机,降低人力成本。针对不同的异常情况,有明确的应对机制,如远程飞行员接管、备用飞行员待命等,安全冗余较高。通过重复多次实验,能不断优化系统性能,且与双人制模式的对比可直观体现其效率优势^[7]。

缺点:在异常飞行场景下,对远程飞行员的决策速度和能力要求苛刻,短时间内的决策压力较大。模拟平台的场景模型虽包含多种情况,但与实际复杂的空中环境仍有差距,可能导致实验结果与实际应用存在偏差。通信系统中,地面有线网络和卫星链路的切换与稳定性仍需进一步验证,尤其是跨洋飞行时的卫星链路传输,可能面临信号衰减等问题。

3.3.3 全自动驾驶方案

优点:完全脱离人工干预,能避免人为操作失误带来的风险,且无需配备地面操控人员,极大地降低了人力成本。强化后的机载自主系统采用激光雷达与视觉摄像头融合感知,环境识别精度高,改进型决策算法支持动态调整航线,应对复杂空域和突发情况的能力较强。数据链路的冗余设计保障了关键指令的传输,应急场景下的预设程序能快速响应,如自主识别备降机场并完成着陆,提升了应急处理的效率。

缺点:技术难度极高,对机载自主系统的可靠性和稳定性要求近乎苛刻,一旦系统出现故障,可能引发严重后果。虽然模拟场景扩展至复杂空域,但实际空中环境千变万化,系统能否应对所有未知情况仍需长期验证。地面端仅保留监控模块,不设人工操作接口,在系统出现异常且预设程序无法解决时,缺乏人工干预的手段,安全风险较大。此外,自主生成飞行计划并报告 ATC 的过程中,与空管系统的协同配合可能存在磨合问题。

4 结语

本文聚焦商用飞机智能无人驾驶领域,完成了地面有人远程操控、地面有人监控的自动驾驶及全自动驾驶三种方案的设计与分析。作为方案设计类研究,重点构建了各方案的技术框架、实验流程与核心要素,未涉及具体实验数据及量化结论。

从方案设计来看,地面有人远程操控方案基于现有民用飞机改装,明确了卫星通信、传感器配置及地面控制流

程, 突出了人工主导的远程协同操控逻辑; 地面有人监控的自动驾驶方案依托 CRPA 系统架构, 搭建了“机载自主系统 + 地面监控干预”的协同模式, 细化了正常与异常场景下的操作规范; 全自动驾驶方案则强化了机载自主系统的感知与决策能力, 设计了无人工干预的飞行流程及冗余保障机制。

三种方案的设计各有针对性: 地面有人远程操控注重对人工经验的依赖与现有技术的衔接, 地面有人监控的自动驾驶强调效率与安全的平衡, 全自动驾驶聚焦技术前瞻性与自主化水平。尽管缺乏实验数据支撑, 但方案均围绕提升运营效率、缓解飞行员短缺等行业痛点展开, 为后续实验验证提供了清晰的框架与方向。

从上述方案的对比来看, 地面有人远程操控的无人驾驶商用飞机方案和地面有人监控的自动驾驶飞行方案虽各有优势, 但都存在明显的局限性。地面有人远程操控方案过度依赖人力, 运营成本高且受人为因素影响大; 地面有人监控的自动驾驶飞行方案在异常场景下对人员决策要求过高, 且模拟环境与实际存在差距。因此, 这两种方案更多是无人驾驶商用飞机发展过程中的过渡形式, 它们为全自动驾驶方案的成熟积累了技术和经验。

在实验验证层面, 需依据各方案的技术特点设计系统性实验。对于地面有人远程操控方案, 可通过模拟不同通信延迟、复杂空域场景, 采集轨迹偏差、指令响应时间等数据, 量化其与传统驾驶模式的差异; 地面有人监控的自动驾驶方案需重点测试异常场景下的干预响应效率, 统计不同角色协作的操作覆盖率; 全自动驾驶方案则需验证传感器融合精度、决策算法的动态调整能力及应急程序的有效性, 积累航线偏移量、空管交互成功率等关键指标。

在方案优化方面, 结合实验数据进一步完善技术细节。例如, 根据地面有人远程操控的通信延迟数据优化信号传输机制; 依据地面监控自动驾驶的干预案例调整人机协同策略; 针对全自动驾驶的场景识别短板升级感知算法, 逐步提升方案的可行性与可靠性。

在行业应用探索上, 以方案设计为基础, 推动小范围试点。可先在封闭空域对全自动驾驶方案进行技术验证, 在固定短途航线测试地面有人远程操控模式, 在中长途航

线开展地面有人监控自动驾驶的模拟运营, 通过实践反馈迭代方案设计, 为最终形成可商用的智能无人驾驶体系奠定基础。

NASA 曾对无人驾驶航空领域做出预判, 认为全自动驾驶将是未来商用飞机的主流发展方向。这一预判的原因主要在于, 随着人工智能、传感器、通信等技术的不断进步, 全自动驾驶方案能够逐步克服当前的技术难题, 实现更高的安全性和效率。相比前两种过渡方案, 全自动驾驶方案彻底摆脱了对人工的依赖, 能够避免人为操作的不确定性, 同时大幅降低运营成本, 更能适应未来航空运输的大规模、高效化需求。而且, 随着技术的持续迭代, 机载自主系统的可靠性和应对复杂情况的能力将不断提升, 与空管系统的协同也将更加顺畅, 从而推动全自动驾驶方案成为无人驾驶商用飞机的未来潮流。

未来, 随着实验数据的积累与方案的持续优化, 商用飞机智能无人驾驶技术将逐步从设计走向实践, 有望为航空业的智能化转型提供扎实的技术参考与路径指引。

参考文献:

- [1] 蒋欣. 商用飞机智能飞行前景展望 [C]. /2019 年全国工业流体力学会议, 2019.
- [2] 罗悦, 王森, 肖刚等. 商用飞机远程驾驶模式的概念架构 [J]. 南京航空航天大学学报, 2020.
- [3] 王森, 肖刚, 王国庆. 单一飞行员驾驶模式技术 [J]. 航空学报, 2020.
- [4] 于大勇. 汽车辅助驾驶: 激光雷达与纯视觉之争 [J]. 中国高新技术产业导报, 2025.
- [5] Zhang J, Zeng R. Mode design and test for commercial aircraft single-pilot operations[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020.
- [6] Luo Y, Wang M, Xiao G, et al. Conceptual architecture for remotely piloted operation mode in commercial aircraft[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [7] Wang M, Xiao G, Wang G Q. Single pilot operation mode technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020.