

# 人工智能在民用航空器维修与适航技术中的应用探究

王 溢

四川航空股份有限公司 四川成都 610202

**摘 要：**民用航空器维修与适航技术模式正被人工智能深度变革，在智能故障诊断、维修决策支持、自动化适航审查及虚拟化维修培训等关键场景的应用，人工智能发挥了显著作用，使得维护效率与飞行安全裕度得到了提升。不过，困难的数据整合、难题式的算法可靠性认证以及高昂的技术落地成本构成了主要挑战。因此，推动行业发展就需着力去构建航空专用数据与算力平台，对可解释的合规算法展开研发，并建立起配套的认证标准体系，以此来让人工智能在保障航空安全与效率方面的巨大潜力得以实现。

**关键词：**人工智能；民用航空器；维修保障；适航技术；应用探究

## 引言

人工智能（Artificial Intelligence）是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新技术科学。民用航空器的安全运行高度依赖于高效可靠的维修保障与严格的适航管理，而随着机队规模不断扩大以及技术复杂度持续提升，传统模式在效率、精准度方面就面临瓶颈。人工智能在解决这些难题上展现出了极为巨大的潜力，它的应用有望对维修决策、故障预测、适航审查以及人员培训等环节进行重塑。本文致力于系统地对人工智能在航空维修与适航技术当中的典型应用场景加以梳理，深入剖析当前面临着的数据整合、算法认证以及成本控制等核心障碍，进而去探讨能够推动技术深度落地、可以支撑行业实现智能化升级的可行路径。

## 一、人工智能在维修与适航中的应用场景

### （一）智能故障诊断与预测性维护

人工智能驱动的智能故障诊断系统依托部署于航空器关键系统的多源传感器网络，这些传感器持续捕获发动机振动频谱、液压管路压力波动、飞行控制系统作动器行程等关键参数并转化为标准化数据流。该数据流通过机载边缘计算节点或在授权地面站进行高速预处理，滤除环境噪声干扰并提取设备运行特征向量，随后输入

经过大量历史失效案例训练过的深度神经网络模型库进行实时特征比对分析，模型能够精准识别旋转部件微裂纹引发的异常谐波分量或密封件退化造成的细微渗漏压力曲线畸变等早期故障征兆，并依据特征偏离度生成量化预警等级。预测性维护模块则融合当前诊断结果与部件全寿命周期档案，在数字孪生平台上构建特定系统剩余使用寿命的高保真退化模型，该模型通过动态关联飞行任务剖面强度与当前金属疲劳累积速率，计算出关键轴承在特定载荷谱下的剩余安全循环次数<sup>[1]</sup>。基于此模型给出的时效性预测结果，维修工程团队可预先订购航材备件并协调机库排期，在部件实际性能触及适航安全阈值前生成精确到具体ATA章节号与工卡步骤的预防性更换指令，并且验证替代部件的库存可用性和工具设备兼容性，形成从预测到执行的闭环技术方案。

### （二）维修决策支持系统

在维修决策支持系统中，人工智能技术深度融入工单管理流程，系统自动分析历史维护记录、实时传感器数据以及航司运营计划等多维度信息，动态生成优先级排序科学且执行路径清晰的工单序列。该系统持续追踪飞机技术状态变化与维修基地资源现状，当突发故障或计划调整发生时，核心算法立即启动多目标优化计算，在保障安全裕度的前提下重新规划工单执行窗口与资源匹配方案。针对维修资源调度环节，人工智能模型构建起覆盖人力技能资质、专用设备可用性及航材库存分布的动态图谱，通过模拟不同任务分配策略对机队整体运行效率的影响，自主输出兼顾时效性与经济性的资源调配方案。维修团队依据系统提供的可视化决策看板，能

**作者简介：**王溢（1987.9--）男，汉族，四川省成都市人，本科，职称：中级工程师，主要研究方向：民用航空器维修与适航管理。

够直观掌握各维修站点任务负荷峰值与资源缺口，及时调整人员排班并精准调配航材物流，显著减少飞机停场等待时间。

### （三）适航审查自动化

人工智能合规引擎深度解析航空器维修活动中产生的结构化与非结构化文档，其集成光学字符识别与自然语言处理技术智能读取历史维修工单、无损检测报告及改装记录等关键信息，自动归类和提取关键施工项目细节、使用工具编号以及适航指令引用条款等要素。该引擎内置的适航条款知识图谱主动比对提取信息与CCAR-43部、FAA AC 43.13-1B等规章框架的具体约束条件，精准识别工艺文件中要求双签字的必检项目是否存在检验员确认缺失情况，或检测报告中材料厚度数据是否落入工程图纸批准的红标尺寸范围之外。基于实时动态验证产生的疑点记录，系统自动触发逻辑关联功能，索引该维修单位过去十二个月内内同类型作业的偏差闭合报告与当前风险点进行交叉分析，生成具有上下文关联性的合规风险溯源图谱提交至适航当局的审查数据中心<sup>[2]</sup>。审查员据此可快速锁定需要重点验证的EO执行履历链或FAA 337表格签署有效性等关键证据链节点，显著压缩审查意见反馈周期并同步更新适航资料状态追踪数据库标识，使持续适航文件的真实性核验和程序合规性判定形成智能化闭环监管流程。

### （四）维修培训虚拟化

虚拟现实平台构建起高精度数字孪生模型，将发动机拆装、线路排故等复杂维修场景转化为沉浸式训练环境，学员佩戴头显设备即可感知真实工具扭矩反馈与部件空间关系，如同置身机库实操现场。该平台根据训练大纲自动生成特定故障案例，学员在虚拟空间操作液压管路连接或电子设备舱检查时，系统实时捕捉动作轨迹与操作逻辑，即时标注未按手册执行的步骤偏差。AI教练引擎持续分析学员操作数据流，结合维修标准数据库生成个性化评估报告，针对线路测量值读取错误或紧固件安装顺序混乱等高频失误点，自动推送三维动画演示与标准作业流程提示。训练结束后系统生成能力矩阵热力图，清晰呈现学员在复合材料修补工艺或起落架系统诊断等专项技能的掌握程度，教员据此调整后续训练重点，形成闭环提升机制。

## 二、人工智能技术应用的挑战

### （一）数据壁垒与质量缺陷

人工智能应用环境面临原始数据孤岛障碍，机载

总线记录的二进制飞参数据与机务维修系统中文本格式的工卡执行记录存在语义鸿沟，需要开发能够统一理解ACARS报文缩写规则与工程图纸技术术语的跨域解析引擎。手持终端上传的航线检查影像往往缺乏标准拍摄角度和光照条件，使计算机视觉模型难以稳定识别轮舱管路接头渗漏痕迹的细微色差变化。数据质量缺陷表现为长期运行的振动传感器可能产生零点漂移导致频谱特征失真，尤其当金属疲劳裂纹扩展到特定长度时采集的时域信号会丢失关键谐波分量；维修人员手写录入的部件拆换记录存在拼写变体或计量单位混淆现象，典型如将液压作动筒行程值2.3英寸误标为2.3厘米致使监督学习样本出现系统性偏差。

### （二）算法可靠性认证困境

在算法可靠性认证过程中，民用航空适航审定机构要求明确验证依据，然而深度神经网络等复杂模型隐藏了决策权重分布与特征关联路径，使得审查员难以追溯故障诊断结论如何匹配具体手册条款。黑箱特性导致模型输出的维修建议缺乏透明逻辑链，审查团队无法确认螺栓扭矩计算值或结构损伤评估结果是否严格遵循适航规章给定的确定性框架。现行审定标准基于传统确定性工程方法构建，面对机器学习固有的概率性输出特性时，适航条款与算法验证方法之间存在根本性适配障碍，例如腐蚀预测模型给出的概率化剩余寿命评估难以对应到现行规章中非此即彼的放行标准<sup>[3]</sup>。

### （三）技术落地成本约束

针对技术落地成本约束的具体考量，航空维修人工智能应用的推广面临着多层面的投资压力，精密传感器网络在航空器机体与发动机等关键区域的全面覆盖以及地面处理中心承载海量数据实时运算所需的强劲硬件设施构成了直接且显著的初期资本支出。系统本身的开发则要求具备尖端算法知识与航空工程背景的复合型人才团队投入漫长研发周期，其高度定制化的属性导致无法简单复用通用人工智能解决方案，后续运行阶段持续产生数据标注与模型再训练的人力成本。而复杂集成系统的稳定性保障要求配备专业技术队伍进行全天候运维支持与周期性版本迭代升级，每一次算法或功能的更新又必须经历严格适航符合性验证流程，这些因素共同构成了不可忽视的资源部署负担。

## 三、人工智能深度应用的对策措施

### （一）构建航空专用AI数据集与算力平台

构建航空专用AI数据集需要整合发动机健康监测参

数、航线维修工单文本以及结构损伤图谱等多元异构信息，数据清洗流程专门设计用于剔除传感器误报记录与人工录入矛盾项，工程师团队依据部件故障模式分类体系对历史维修案例进行精细化标注，形成覆盖涡轮叶片裂纹扩展规律到航电系统偶发故障特征的标准化数据湖。算力平台架构采用边缘计算节点与云端训练集群协同模式，部署在机库的本地服务器实时处理飞机实时传输的振动频谱与油液颗粒数据，避免海量原始数据回传造成的带宽压力，而云端GPU集群则承担长周期退化模型的迭代训练任务，根据预测性维护需求动态分配计算资源。该平台建立严格的数据版本控制机制，每次模型更新对应特定时期和机型的数据快照，维护人员追溯诊断逻辑变化时可精确匹配训练数据环境，保证发动机寿命预测算法从开发到部署的全周期可回溯性。数据湖持续吸纳航线排故新案例与部件拆解报告，平台自动触发增量学习流程优化现有模型，使得复合材料分层检测精度随维修经验积累持续提升。

## （二）开发可解释性强的适航合规算法

工程团队需要将文本化的适航条款与维修规程转化为机器可识别的逻辑规则树，这一过程要求算法工程人员具备穿透性理解飞机系统原理与故障传播模型的专业能力，他们构建的诊断模型在输入端必须完整区分实时飞行数据流中的有效传感器信号与背景噪声干扰，保障核心故障特征提取的纯净度。模型自身应当采用模块化层级结构使得每个推断环节具备可视化的决策依据，工程师能够逐层回溯算法得出特定结论的内在推理链条，例如发动机振动趋势异常判定需要清晰地展示引发告警的关键参数组合及其历史变化轨迹而非给出黑箱式判断<sup>[4]</sup>。适航监察人员基于标准化的算法行为记录文件而非抽象性能指标实施符合性判定，技术文档中详细描述的特征工程处理方法、异常检测阈值设定逻辑以及故障判定边界条件构成审查的关注点，这种透明化机制确保算法在维修任务中的部署满足法定安全标准，同时维修单位能够对系统保持持续技术信任从而推进更广泛的应用落地。

## （三）制定AI维修工具的认证标准与流程

在制定AI维修工具的认证标准时，审定机构需要明确界定算法性能边界指标，具体包括故障模式覆盖率、虚警率容忍阈值及决策置信度区间等核心参数，这些量化要求直接关联飞机放行安全底线。认证流程强制要求

算法开发团队提交可验证的测试证据包，涵盖从训练数据采样策略到模型鲁棒性压力测试的全套文档，特别关注导线磨损预测或液压阀卡滞识别等关键场景的失效模式分析报告。针对黑箱模型特性，标准强制引入分层可解释性模块，例如要求卷积神经网络在输出起落架衬套裂纹检测结果时同步生成热力图，直观显示图像区域判定依据是否聚焦于实际应力集中部位。工具正式部署后建立持续监控机制，当发动机振动分析算法在新型复合材料机翼环境下出现偏差时，自动触发版本冻结并回滚至上一认证状态，同时向审定方提交适应性修改方案。整个生命周期采用模块化认证方法，允许单独更新传感器校准子模型而不影响主诊断系统的审定有效性，大幅降低适航符合性维护成本。

## 结语

人工智能在民用航空维修与适航领域的融合应用已成为提升飞行安全、运营效率和保障能力的关键驱动力，在智能诊断、决策支持、自动化审查还有虚拟培训等场景中，其价值初步得到了印证。要释放人工智能的全部潜能就必须克服数据质量存在的缺陷、突破算法可靠性认证的瓶颈以及平衡技术投入方面的成本等。基于此，行业方面需要协同起来去构建高质量的航空数据集以及算力基础设施，优先去发展具备很强可解释性、并且能够满足适航审定要求的智能算法，同时加快制定出统一的关于人工智能维修工具的认证规范与流程，以此为航空维修与适航管理朝着智能化新时代迈进筑牢坚实的基础。

## 参考文献

- [1] 杜泽府. 人工智能技术在航空维修领域的运用[J]. 空运商务, 2023, (06): 61-64.
- [2] 孔旭, 于得水, 丁坤英, 等. 航空器预测性维修技术研发应用态势分析[J]. 航空工程进展, 2021, 12 (02): 21-29.
- [3] 李润玲, 魏伟, 王娜. 机载设备研制阶段适航及第三方监督方法探究[J]. 航空计算技术, 2021, 51 (06): 92-95.
- [4] 白建坤, 卢海军, 柯振东. 民用航空器维修跟随机器人控制算法研究[J]. 科学技术创新, 2024, (20): 80-83.