

飞机维修效率提升关键技术研究

赵玉峰 吕阳

深圳航空有限责任公司西安分公司航线维修分部, 中国·陕西 西安 710000

摘要: 随着全球航空运输业的蓬勃发展, 航空客运与货运市场需求持续攀升, 各航空公司机队规模随之不断扩大, 飞机日常检修、故障维修等需求也呈现出激增态势。相关研究表明, 物联网、大数据、人工智能等多技术融合应用, 是突破行业发展桎梏、提升飞机维修效率的必然趋势。该模式能够精准定位故障根源, 有效降低无效工单占比, 大幅缩短故障排查时间, 科学优化人力与物资资源配置效率, 为航空维修行业的数字化转型与智能化升级提供重要的技术参考与可复制的实践范式。

关键词: 飞机维修; 效率提升; 预测性维修; 数字孪生; 协同保障

Research on Key Technologies for Improving Aircraft Maintenance Efficiency

Zhao Yufeng, Lv Yang

Shenzhen Airlines Co., Ltd. Xi'an Branch Route Maintenance Division, China Shaanxi Xi'an 710000

Abstract: With the booming development of the global air transportation industry, the demand for air passenger and cargo markets continues to rise, and the fleet size of various airlines continues to expand. The demand for daily aircraft maintenance, fault repair, and other services is also showing a surge trend. Related studies have shown that the integration of multiple technologies such as the Internet of Things, big data, and artificial intelligence is an inevitable trend to break through industry development constraints and improve aircraft maintenance efficiency. This mode can accurately locate the root cause of faults, effectively reduce the proportion of invalid work orders, significantly shorten the troubleshooting time, scientifically optimize the efficiency of human and material resource allocation, and provide important technical references and replicable practical paradigms for the digital transformation and intelligent upgrading of the aviation maintenance industry.

Keywords: Aircraft maintenance; Efficiency improvement; Predictive maintenance; Digital twin; Collaborative guarantee

0 引言

提升飞机维修效率成为行业高质量发展的迫切需求。因此, 开展飞机维修效率提升关键技术研究, 探索数字化、智能化技术在维修领域的融合应用路径, 对推动航空维修行业转型升级、保障民航业安全高效发展具有重要的理论与实践意义^[1]。

1 飞机维修效率提升的核心技术体系

1.1 可视化交互技术

可视化交互技术以 AR 增强现实与数字孪生为核心, 通过虚实融合实现维修信息的直观呈现与维修过程的精准管控。AR 技术借助智能终端将虚拟的维修指引、技术手册、3D 模型等信息叠加到真实维修场景中, 实现“所见即所得”的维修指引; 同时, 通过语音识别、手势控制等自然交互方式, 简化操作流程, 减少信息获取时间。数字孪生技术则通过构建维修场景的数字化镜像, 整合人流、物流、数据流等多维度信息, 实现维修过程的实时监控、模拟仿真与优化决策^[2]。

5G 技术的商用部署为可视化交互技术的规模化应用提供了关键支撑。5G 网络的高速率 (理论峰值 20Gbps) 可实现复杂 3D 模型与高清视频的即时加载; 超低延迟 (理论值 1ms) 确保远程协作时的实时交互; 大连接特性允许维修现场大量传感器、智能设备同时接入, 实现多终端协同工作。5G 与 AR、数字孪生的融合, 打破了传统维修的空间限制与信息壁垒, 为维修效率提升提供了技术基础^[3]。

1.2 预测性维修技术

预测性维修技术以“数据驱动”为核心, 通过采集飞机各系统运行参数、维修记录、环境数据等多源信息, 借助大数据分析 with 人工智能算法, 实现故障的提前预警与剩余寿命预测, 从而将维修模式从“定期维修”“事后维修”转变为“按需维修”。其核心架构包括数据采集层、数据处理层、模型分析层与决策输出层: 数据采集层通过传感器、QAR/DAR 记录仪、维修管理系统等设备实时采集多维度数据; 数据处理层对采集的数据进行清洗、整合与标准化处理, 剔除异常数据, 构建结构化数据集; 模型分析层基

于机器学习、深度学习等算法构建故障预测模型，识别故障特征与演化规律；决策输出层根据模型分析结果生成维修建议，推送精准维修工单。

1.3 协同保障技术

协同保障技术以 5G+ 物联网为核心，构建“人员 - 设备 - 航材 - 系统”全要素互联的维修保障网络，实现维修资源的动态优化配置与全流程高效协同。其核心逻辑是通过物联网设备采集维修现场各类要素的实时数据，借助 5G 网络传输至云端管理平台，通过大数据分析实现资源需求预测、配送路径优化、任务动态调度等功能。同时，引入智能仓储机器人、自动导向车（AGV）等自动化设备，实现航材存储、搬运、配送的无人化操作，减少人工干预，提升保障效率。

2 飞机维修效率提升技术应用的挑战

2.1 数据标准不统一，融合难度大

飞机维修数据搜集渠道广泛，诸如制造商的设计资料、航空公司的运营数据、维修单位的维修记录以及传感器的实时数据等，但不同数据源的格式、标准不统一，数据源之间呈现割裂状态，各型号传感器在数据采集的频率和参数定义上呈现出差异，维修记录的录入规范不统一，导致多源数据融合分析工作面临困难，使预测性维修模型的精确度与泛化能力受损，数据安全和隐私保护问题愈发明显，飞机维修数据中透露着核心技术参数和运营机密等敏感内容，如何妥善处理数据共享与安全防护的矛盾，这对技术应用领域而言是一大挑战。

2.2 技术融合协同不足，应用碎片化

众多企业所采用的技术应用模式呈现出分散的态势，AR 技术、预测性维修、智能物流等技术多独立部署，协同效应尚在萌芽阶段，一些企业开始采用 AR 维修辅助系统，该系统并未与航材管理系统形成联动机制，维修人员仍需手动核查航材库存状态；该模型输出的预测结果未能与维修排班系统实现直接对接，维修计划调整由此变得滞后，5G 及边缘计算相关技术的实施还处于初级阶段，诸多机场及机库区域的 5G 网络尚未实现全面覆盖，网络延迟不稳定，阻碍了 AR 远程协作及实时数据传输等功能的顺畅运行。

2.3 专业人才匮乏，技术落地受阻

飞机维修效率提升技术的应用需要复合型专业人才，必须具备航空维修领域的专业知识基础，同时需掌握大数据分析、人工智能及物联网等相关技术，行业内这类复合型人才严重匮乏，许多传统维修人员在数字化技能上显得力不从心，对 AR 设备、智能管理系统等新工具的操作尚不熟练；技术研发人员对航空维修的操作流程尚欠熟悉，技术方案与实际需求出现脱节现象，人才匮乏导致技术落地效率低、应用效果不佳，抑制了技术的推广

步伐。

2.4 前期投入大，成本回收周期长

智能化维修技术的部署需要大量前期投入，涉及智能设备购置、系统开发、网络升级和人员培训等关键环节，一座智慧机库的建设投入超千万元，实施预测性维修系统所需的成本在数百万元以上，中小型维修企业普遍面临资金重压，资金瓶颈明显；即便对于那些规模庞大的企业而言，初始阶段成本回笼所需的时间相对较长，部分企业因此对技术升级持观望态度，技术进步速度迅猛，设备折旧与系统升级等后续投入成本较为沉重，企业不得不面临更高的成本投入要求。

3 飞机维修效率提升技术应用的优化策略

3.1 实施统一的数据标准，筑牢数据安全防线

建议由民航局担任行业牵头单位，集结核心飞机制造商、主要航空公司、专业维修企业及相配套科研机构，联合发起成立数据标准化行业小组。该委员会的核心任务就是制定一套适用于全行业的航空维修数据标准化体系，详细规定数据采集格式、参数定义的精确性、接口连接协议、元数据说明及数据传输规范，确保从飞机健康监测系统、维修工作卡、航材供应链到人员资质等各类数据能在统一语义下互联互通。

在数据聚合与共享的潮流中，数据安全和隐私保护必须置于同等重要的战略高度，应当设立一个多层次、深入的防御体系，在数据传输的关键阶段，全面采纳顶级加密技术；在数据存储及检索阶段，严格执行基于角色权限的访问控制及最小权限要求，并积极探索区块链技术固有的不可篡改性，实施对关键维修事项和适航指令执行状态的存档工作，维持数据的可溯源与可信赖状态。有必要建立一套职责分明的数据安全监管体系，制定全面细致的数据安全管理制度，界定数据所有者、管理者、使用者和监管者的权责范畴，规范数据开放、脱敏、共享以及销毁的全生命周期操作流程，定期实施安全评估与审查机制，采用尖端威胁检测技术，采取预防措施以阻挡数据泄露、篡改及滥用的风险，兼顾数据价值释放与保护，构筑坚实的数据安全壁垒。

3.2 形成多技术融合的协同体系，全面优化基础设施建设水平

单一技术的应用已难以满足现代航空维修对效率、安全与精准性的极致追求，务必实现多项前沿技术的综合集成与协同进步，力求构建一个“端 - 边 - 云”联合、“感知 - 分析 - 决策 - 执行”全流程无缝对接的智能维修生态网络，运用机器学习对预测性维修模型实施故障预警与寿命预测后得到的分析结果，已摆脱单一预警提示的局限，而是自动、实时地推送至维修工程管理（MRO）系统、智能排班系统以及航材供应链管理系统，这一协同作用可

激活一连串自动化的反应机制,维修任务自动生成、具备相应资质的技术人员被提前调度、所需航材和工具通过智能物流系统(如 AGV 小车、无人机库房)精准配送到位,大幅减少了故障反应与维修准备时间的冗余。

进一步推进增强现实(AR)等技术与后台系统的有机结合,维修人员借助 AR 眼镜获取的维修指南,可直接对数字孪生平台的虚拟飞机模型实施联动,每当一个维修阶段被顺利攻克,进度数据便实时回传并同步更新数字孪生体状态,实现现实与虚拟世界间的实时对接与交互。这样的设计让远程专家仿佛直接进入现场,也为维修质量控制和历史追溯提供了可视化数字档案,保障实时交互及海量数据的快速传输,加紧在机场、维修机库等关键场所部署 5G 专网及边缘计算等新型基础设施,全面实现 5G 网络的覆盖,利用其高带宽、低时延、大连接的特性保障数据畅通。通过边缘计算节点在数据源头进行预处理和即时分析,仅上传关键性结果到云端,有效降低了网络负荷和传输的滞后感,保障 AR 远程协作及实时监控等高度互动应用的流畅操作和可靠性能,赋予智能化维修系统灵敏的感知与快速的动作能力。

3.3 加强人才培养与引进,优化团队在数字化技能上的综合能力

亟需拓展人才输送的渠道,加强与各类高等及职业院校的合作互动,合作开展“航空智能维修”专业、联合实验室及实习实训基地的建设,精心培育既掌握航空维修理论又熟练操作的技能人才,又精通数据分析、人工智能基础或软件应用的复合型应用人才。增强对顶尖人才与跨领域人才的吸纳强度,制定专门扶持方案及激励办法,积极引进大数据、算法、物联网等领域的专业人才充实航空维修行业,与资深维修专家、工程师共同组建跨学科的技术研发与攻关团队,确保前沿技术方案能精准对接和解决复杂的实际业务痛点。构建一个持久的创新激励体系极为关键,应设立技术创新基金、举办数字化技能竞赛、推行创新成果奖励与收益分享制度,鼓励一线员工提出优化建议、参与技术改进项目,打造全行业敢于创新、乐于探索的文化风气,进而助力维修队伍实现数字素养与创新活力的全面升级与长期稳定。

3.4 创新投入模式,降低企业成本压力

就设备与软件应用层面而言,积极倡导从“购买资产”到“购买服务”的轻资产化转型,鼓励企业采用设备租赁、平台订阅、服务外包等灵活模式获取智能化能力,

前沿 AR 眼镜、自动化引导运输车(AGV)、专用检测机器人等高端技术设备,可向专业的设备租赁公司租赁,收费模式为依据时长与工作量;运用预测性维修算法及数字孪生技术的相关软件服务,可按软件即服务(SaaS)模式进行订阅。此举显著缓解了企业在购置固定资产时的初期投入压力及后续维护的负担,政府需实施更具针对性的扶持措施,初步实施智能维修和数字化改造的企业群体,实行一定比例的财政支持、税收抵免和贷款利息贴现,促进企业迅速降低成本压力,增强企业转型升级的动力。企业需构建一套周密的技术投资项目评审体系,在推行任何新型技术或方案的前夕,全面实施成本效益分析与场景匹配的适应性检验;对实施成效进行持续监测与分析,诸如故障诊断时间缩短、误拆率降低、航材库存周转率提高等关键指标,采用数据驱动的评估策略,优先选取并推广那些在关键环节上效益显著且见效迅速的技术方案,实现资金的高效精准分配,持续有序地推进智能化进程的全面实施。

4 结语

当前飞机维修效率提升主要依赖可视化交互、预测性维修及协同保障三类技术,针对操作精准、维修主动、资源协同三个关键维度展开,解除传统维修的困扰,多技术融合能够实现协同增效,缩短维修时间、优化资源配置,但目前仍面临数据标准不一、融合深度不足、人才短缺和成本较高等挑战。需通过统一数据标准、深化技术集成、加快人才培养和创新投入模式等策略加以推进,伴随着 5G-A/6G、人工智能及数字孪生等技术的不断深化,维修效率提升将向更智能化、自主化和全域化方向演进,在政策与标准的双重推动下,相关技术将逐步降低成本、广泛普及,引领航空维修领域迈向高品质发展新阶段,未来研究可进一步聚焦自主核心算法与无人化维修技术等关键方向。

参考文献:

- [1] 刘新力. 航空维修对航空物流供应链效率的影响研究[J]. 中国航务周刊, 2024,(33):78-80.
- [2] 李小龙, 徐启明. 大运行理念下飞机维修成本精益管理[J]. 民航管理, 2021,(10):58-63.
- [3] 杨鹏飞. 数智新技术在民用航空维修中的应用[J]. 科技与创新, 2021,(10):60-62+64.

作者简介:赵玉峰(1990.12-),男,甘肃武威人,汉族,大专,助理工程师,研究方向:从事飞机维修研究。