

飞机维修技术创新与产业发展趋势

白树魁 弓凡永智

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: 本文基于全球及中国飞机维修市场发展现状, 系统剖析了行业技术创新的三大核心方向: 数字化检测技术、预测性维修系统和复合材料修复工艺。展望未来, 产业将呈现出智能化渗透率持续提升、国产大飞机维修业务成为新增长点、产业链上下游整合进程加速、绿色低碳维修生态体系逐步构建四大核心趋势。通过加快关键技术自主化进程、构建现代化维修保障体系, 将有力推动产业向高质量、高效益方向转型, 为中国航空业在全球竞争中实现跨越式发展提供坚实支撑。

关键词: 飞机维修; 技术创新; 产业发展; 趋势

Technological Innovation and Development Trends in Aircraft Maintenance

Bai Shukui, Gong Fanyongzhi

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

Abstract: Based on the development status of the global and Chinese aircraft maintenance markets, this paper systematically analyzes three core directions of industry technological innovation: digital inspection technology, predictive maintenance systems, and composite material repair techniques. Looking ahead, the industry will exhibit four key trends: continuous improvement in intelligent penetration rates, the emergence of domestic large aircraft maintenance as a new growth driver, accelerated integration across the upstream and downstream supply chain, and the gradual establishment of a green and low-carbon maintenance ecosystem. By accelerating the localization of key technologies and building a modernized maintenance support system, the industry will be effectively propelled toward high-quality and high-efficiency transformation, providing robust support for China's aviation sector to achieve leapfrog development in global competition.

Keywords: Aircraft maintenance; Technological innovation; Industrial development; Trend

0 引言

随着全球航空业的持续扩张、国产大飞机产业化进程加速以及新技术革命的深度渗透, 飞机维修行业正迎来以技术创新为核心驱动力的转型升级期。传统“事后维修”“计划维修”模式逐步向“预测性维修”“智慧维修”迭代, 技术创新与产业升级形成双向赋能格局。本文基于全球及中国飞机维修市场发展现状, 深入剖析技术创新的核心方向与应用实践, 预判产业未来发展趋势, 为行业高质量发展提供参考。

1 飞机维修行业发展现状与核心驱动力

1.1 全球市场规模稳步扩张, 区域格局持续优化

全球飞机维修市场在航空业复苏与机队规模扩张的双重推动下, 呈现持续增长态势。据市场调研数据显示, 2025 年全球飞机维修市场规模约为 1200 亿美元, 预计到 2030 年将增长至 1800 亿美元, 复合年均增长率 (CAGR) 达到 6.2%。从区域分布来看, 北美和欧洲凭借成熟的航

空基础设施与庞大的老旧机队, 目前仍是全球主要市场, 2025 年分别占据 35% 和 28% 的市场份额, 预计到 2030 年将稳步提升至 38% 和 30%。

亚太地区作为新兴增长极, 展现出强劲的发展活力。中国、印度等新兴市场的航空业快速发展, 推动区域维修需求持续攀升, 预计到 2030 年亚太地区市场份额将达到 22%, 成为全球第三大市场。其中, 东南亚地区受益于窄体机队规模扩张, 第三方维修服务需求旺盛, 为中国 MRO 企业出海提供了重要机遇。

1.2 中国市场高速增长, 结构性机遇凸显

中国飞机维修市场依托国内航空业的蓬勃发展, 呈现出高于全球平均水平的增长速度。2025 年中国飞机维修市场规模约为 1200 亿元人民币, 预计到 2030 年将增长至 2500 亿元人民币, 复合年均增长率达到 8.5%。这一增长主要得益于三大核心因素: 一是机队规模持续扩张, 截至 2023 年底国内民航运输飞机总量已达 4165 架, 预计到

2030 年将达到 5000 架左右, 年均新增维修需求将突破 200 架次; 二是老旧机队延寿维修需求激增, 波音数据显示中国民航机队中机龄超 12 年的飞机占比已达 35%, 高价值定检维修需求持续释放; 三是国产大飞机产业化进程加速, C919、ARJ21 等机型交付量提升, 催生了配套维修市场的增量空间, 其中 C919 全寿命周期维修市场空间预计达 800 亿元。

1.3 政策与技术双轮驱动, 行业发展环境持续优化

政策支持是飞机维修行业发展的重要保障。国际层面, 国际民航组织 (ICAO) 不断完善适航监管标准, 推动维修行业规范化、标准化发展, 同时强化航空业碳排放管控, 倒逼维修技术绿色升级。国内层面, 民航局《“十四五” 航空运输旅客服务专项规划》明确要求提升维修数字化能力, 2024 年发布的航空维修产业专项补贴细则则进一步撬动企业技术升级投入; 低空开放政策的推进, 也催生了通用航空维修市场的增量需求。

技术进步为行业发展注入核心动能。人工智能、大数据、物联网、增材制造等新技术与维修场景的深度融合, 不仅提升了维修效率与准确性, 还推动了维修模式的根本性变革。例如, 基于 AI 的故障预测与健康管理系统 (PHM) 能够提前识别潜在故障风险, 降低维修成本; 增材制造技术可快速生产定制化维修部件, 缩短维修周期; VR/AR 技术则突破了维修培训的场地与设备限制, 提升了人才培养效率^[1]。

2 飞机维修技术创新的核心方向与应用实践

2.1 构建全流程数据驱动体系

飞机维修领域的创新离不开数字化的核心支撑, 其核心要义在于实现维修各环节的数据采集、整合及利用, 消除信息壁垒, 提升维修决策的科学化与精确化水平。

PHM 作为数字化转型的关键支柱, 飞机的机体、引擎以及航电系统等关键部分均配备了该系统所部署的传感器, 对飞行数据与设备运行状态进行连续采集, 借助大数据分析技术实现故障的早期预警与精准定位, 引导维修实践从“事后反应” 转变为“事前预防” 的全新路径。国内航空公司纷纷采纳成熟的飞机健康管理技术, 南航“天翼天瞳” 系统、厦门航空飞机健康监控系统、吉祥航空飞机健康管理平台, 这些系统通过“云端听诊” 实现了飞机运行状态的实时监控、精准预测与智能决策, 向全球航空维修领域输出了中国式的实用方案, 系统可自动探测发动机内部裂纹及腐蚀类损伤, 其缺陷识别精度超越了手工检测的精准度, 有效提升了发动机维修工作的安全性以及效率^[2]。

2.2 前沿技术重塑维修作业模式

智能化是在数字化基础上的进一步升级, 采用智能设备、机器人技术及人工智能算法等高科技手段, 使维修作业迈向自动化、精确及无人化, 显著减少人工依赖及操作

风险水平。如山东航空的航空智能气压表则实现了压力参数的自动采集与校准, 大幅提升了检测数据的精确水平, 采用智能设备, 大幅提升了维修作业的精确性, 还降低了一线机务人员的劳动强度与安全风险。

2.3 响应环保要求的技术革新

面临全球“双碳” 战略的实施大背景, 绿色维修技术成为行业创新的重要方向, 其核心焦点是实施材料与工艺的革新, 减少维修环节对能源消耗和环境的侵害。环保型维修材料的使用范围正逐步扩大, 传统维修过程中使用的清洗剂、润滑油等材料多含有害物质, 环境污染现象显现, 开发与应用生物基清洗剂及可降解润滑油等环保材料, 显著降低维修作业的污染物排放水平, 采用植物提取成分作为原料, 非有害、可自然分解、去污性能强的特点融为一体, 已在部分航空公司的机身清洗、发动机零部件清洁等场景中推广应用。低碳化维修工艺正逐步走向成熟阶段, 喷涂工艺是飞机维修中的重要环节, 传统喷涂工艺存在涂料浪费严重、VOCs 排放超标等问题, 应用静电喷涂及粉末喷涂等低碳环保涂装工艺, 有效提升了涂料的利用水平, 进而大幅降低了环境污染的有害气体排放量; 采用激光熔覆技术对零部件进行修复处理, 实现材料的高精度堆叠, 减少材料浪费, 有效延长修复件的使用期限, 受政策推动, 生物基清洗剂、低碳喷涂工艺等环保方案的渗透率将从 2030 年的 18% 提升至 50%, 带动相关细分市场产值突破 200 亿大关。

2.4 重塑维修供应链与培训模式

增材制造 (3D 打印) 技术正在重塑飞机维修的供应链体系, 传统航材采购周期长、库存成本高, 尤其是那些老旧型号飞机的珍稀零件, 常陷入零件难觅的窘境, 针对维修需求的增材制造技术, 高效产出符合精度标准、度身定制的零部件, 明显减少了航材供应的周期, 有效削减了库存开支。采用金属 3D 打印手段修复发动机叶片, 迅速应对叶片的破损, 显著增强了叶片的耐磨及耐腐蚀性能, 3D 打印航材修复技术预计在 2027 年实现规模化商用, 可降低 30% 的航材库存成本, 国内诸多维修单位已经迈出了增材制造技术试用的第一步, 增材制造技术在飞机零部件维修及工装夹具制造等多个应用场景中均展现出良好的效果。

VR/AR/MR 技术则彻底改变了飞机维修培训的模式, 依赖实体设备进行的是传统的维修培训, 问题主要集中在成本高、风险大以及覆盖范围不足, VR 技术通过构建虚拟维修场景, 学员得以在虚拟环境里不断模拟实施高风险及非标准操作, 诸如发动机拆卸、燃油系统养护等操作, 有效削减了培训开支, 显著提高了培训的安全性水平; AR 技术将维修手册及操作指南等资料实时映射至实体表面, 为一线机务人员执行复杂维修任务提供支援。

3 飞机维修产业发展趋势预判

3.1 智能化渗透率持续提升，技术融合更加深入

智能化技术将成为推动飞机维修行业进步的关键力量，智能维修系统渗透率将从 2030 年的 28% 提升至 2030 年的 65%，基于 AI 的故障预测与健康管理（PHM）系统市场规模年增速将超过 30%，逐步迈向“状态监控”向“智能决策”的升级阶段，汇聚飞机运作数据、维修过往记录及气象等多种相关资讯，精确预估故障的爆发时间及影响范围，自动编制最恰当的维修策略。技术融合的步伐将不断加快，人工智能与机器人技术的联姻，维修作业将进入全面自动化阶段，如自动巡检机器人可实现飞机表面损伤的全天候检测，智能拆装机器人可完成发动机核心部件的精密装配；全面推进大数据与物联网技术的深度融合，构建一个全方位感知与全链条互联的维修数据中心，实现飞机、维修设备、人员与航材的实时协同运作；增材制造与数字孪生技术的互补融合，构建起“设计－打印－检测－维修”这一完整闭环流程体系，大幅提升零部件维修的精确性和效率水平。

3.2 国产大飞机维修成新增长点，区域竞争加剧

国产大飞机维修将成为中国市场的核心增长点，我们期待 C919 机队规模达到 200 架的里程碑时刻，其配套维修市场将逐步规模化显现，预计 2028 年将贡献当年维修市场规模的 6.2%；ARJ21 系列飞机的维修部分预计将占总维修任务的 3.8%。实施我国大型飞机维修体系的构建工程，将加快维修技术、航材及标准的国产替代步伐，降低对外部技术的依赖比重，推动行业核心竞争力的上升，国产长江 CJ1000 发动机的批量交付将重构发动机维修市场格局，配套 MRO 体系预计带来年均 60 亿元增量空间，区域市场的竞争压力预计将进一步上升，东部地区的 MRO 企业将通过技术升级、产业链整合，维持其在高端市场的市场领导地位，推广维修品牌至国际舞台。

3.3 产业链整合加速，跨界合作成为常态

产业链整合将成为企业提升竞争力的重要路径，企业将进行纵向整合的行动，向上延伸至航材生产、设备研发领域，向维修培训和技术咨询服务领域拓展服务边界，实现全产业链服务的整体布局；实施企业间的横向整合，推进中小维修企业的资源整合与结构重组，增强市场占有率，实现规模经济效应最大化。大型航空公司旗下的维修企业将依托母公司的机队资源，向外扩展维修服务业务版图，并借此机会收购专业技术型企业，加强航空发动机及航电

相关领域的技术维护能力，跨界合作将推动产业生态创新，维修企业与科技公司、高校及科研院所展开深度合作，合力搭建技术先锋平台，促进新技术的研发与市场转化。维修业与 AI 界携手共创故障诊断算法，与高校联合开展 VR 维修培训课程研发，与科研院所合作推进增材制造技术在航材修复中的应用，产教融合工作将得到进一步拓展，航空公司与维修企业及民航高校协同共建实训基地，位于广州的南航校企合作实训基地，通过“校企协同”模式培养符合行业需求的高技能维修人才，将显著减少航空维修领域的劳动力短缺。

3.4 技术迭代与合规成本提升需重点应对

一是技术迭代引发的设备沉没风险，随着智能化技术的快速发展，传统维修设备的淘汰率将达年均 8%，企业需要持续投入资金进行设备更新，对资金实力提出较高要求；二是航材供应链波动风险，受全球地缘政治影响，航空铝合金等关键材料价格波动幅度较大，2024 年已达 15%，影响企业成本控制；三是行业监管趋严带来的合规成本上升，CCAR145R4 新规实施后，企业年均认证支出增加约 20%，中小维修企业面临较大的合规压力；四是高端人才短缺问题，智能化、高端化维修业务的发展需要既懂航空维修又掌握新技术的复合型人才，目前行业人才供给难以满足需求^[3]。

4 结语

飞机维修产业作为航空业安全运营的“基石”，正处于技术创新驱动、产业结构升级的关键时期。未来五年，飞机维修产业将呈现“智慧化引领、绿色化转型、全球化布局、专业化发展”的核心趋势，国产大飞机维修、智能化维修系统、绿色维修技术等将成为行业增长的核心引擎。面对技术迭代、市场竞争与合规管控等多重挑战，维修企业需要聚焦核心技术创新，加强产业链整合与跨界合作，提升全球化服务能力与风险应对能力。

参考文献：

- [1] 邵长春，徐嘉婧. 新海航海航技术：将自贸港飞机维修名片递向全球市场[N]. 海南日报，2025-12-18(122).
- [2] 王立纲，董勤. 基于虚拟现实技术的飞机维修训练系统的设计与研究[J]. 自动化应用，2025,66(21):181-186.
- [3] 王希彬，戴洪德，李飞等. 飞机电搭接装置安装和维修技术要求研究[J]. 飞机设计，2025,45(05):41-46.

作者简介：白树魁（1989.11-），男，甘肃庆阳人，汉族，本科，助理工程师，研究方向：从事飞机维修研究。