

航空零部件维修行业绿色低碳发展路径研究

徐文渊

利勃海尔（中国）有限公司 201208

【摘要】在全球“双碳”战略深入推进、民航业绿色转型提速的大背景下，航空零部件维修（MRO）行业作为民航产业链的关键环节，其绿色低碳发展既是践行国家生态文明建设要求的重要举措，也是行业提质增效、实现高质量可持续发展的核心路径。航空零部件具备高价值、高精度、高可靠性的特性，维修流程涉及能源消耗、危废排放、资源损耗等诸多环保痛点，传统粗放型维修模式已难以适配行业发展新要求。本文就航空零部件维修行业绿色低碳发展的可行路径，进行了一些分析研究，以为行业绿色转型提供理论参考与实践指引，助力民航业全链条碳减排目标落地。

【关键词】航空零部件维修；绿色低碳；循环经济；碳减排；发展路径

Research on the Green and Low-Carbon Development Path of the Aviation Components Maintenance Industry

Xu Wenyuan

Liebherr (China) Co., Ltd., August 201208

【Abstract】 Against the backdrop of the global advancement of the "dual carbon" strategy and the accelerated green transformation of the civil aviation industry, the aviation components maintenance (MRO) sector, as a critical link in the civil aviation supply chain, plays a pivotal role in both fulfilling national ecological civilization requirements and achieving industry-wide quality improvement, efficiency enhancement, and high-quality sustainable development through its green and low-carbon initiatives. Aviation components are characterized by high value, precision, and reliability, while maintenance processes involve significant environmental challenges such as energy consumption, hazardous waste emissions, and resource depletion. The traditional extensive maintenance model can no longer meet the evolving demands of the industry. This paper analyzes feasible pathways for green and low-carbon development in the aviation components maintenance sector, aiming to provide theoretical insights and practical guidance for the industry's green transition and support the realization of comprehensive carbon reduction targets across the civil aviation value chain.

【Key words】 aviation component maintenance; green and low-carbon; circular economy; carbon emission reduction; development pathway

引言

随着我国民航机队规模持续扩张，截至2025年底，国内民航运输机队规模已突破4300架，老旧飞机逐步进入维修、退役高峰期，航空零部件维修市场需求持续攀升，行业规模稳步扩大。与此同时，航空零部件维修流程繁杂，涵盖清洗、检测、加工、修复、涂装、检测验收等多个环节，传统维修模式普遍存在能源利用效率低下、高污染耗材使用量大、危废处理不规范、零部件循环利用率偏低等问题，不仅加剧了生态环境压力，也制约了行业核心竞争力的提升。此外，国际民航组织（ICAO）、欧盟等纷纷出台航空碳减排新规，对航空产业链各环节的碳排放、环保标准提出严苛要求，国内航空零部件维修企业面临着日益紧迫的国际环保合规压力。在此背景下，探索绿色低碳发展路径，破解行业环保与发展的双重矛盾，成为航空零部件维修行业亟待解决的核心课题。

1. 航空零部件维修行业发展现状与绿色低碳发展短板

1.1 行业发展现状

近年来，我国航空零部件维修行业依托民航业快速发展，呈现出规模持续扩张、技术逐步升级、市场主体多元化的发展态势；技术层面，数字化维修、智能检测、再制造等技术逐步推广，头部企业引入AR辅助维修、数字孪生、AI故障预测等先进技术，维修效率与质量显著提升；市场主体方面，形成了航空公司自建维修体系、独立第三方维修企业、中外合资维修公司协同发展的格局，头部企业逐步具备国际维修资质，国际市场竞争力稳步提升。

同时，行业发展也面临着诸多挑战：核心维修技术仍存在短板，部分高端零部件维修依赖国外技术；行业集中度较低，中小型维修企业占比高，维修工艺参差不齐；绿色低碳转型起步较晚，环保投入不足，与国际先进水平存在差距。随着“双碳”战略推进与民航绿色发展要求升级，绿色低碳

已成为行业发展的必然趋势，倒逼行业加快转型步伐。

1.2 行业绿色低碳发展现存短板

(1) 绿色低碳技术应用滞后，维修工艺环保性不足

当前我国航空零部件维修行业绿色技术普及度较低，尤其是中小型维修企业，仍沿用传统维修工艺，环保短板突出。清洗环节，多数企业仍采用化学溶剂清洗，挥发性有机物（VOCs）排放量大，废水、危废处理难度高；涂装环节，传统高 VOCs 涂料仍占主导，环保型水性涂料、生物基涂料应用范围狭窄；加工修复环节，高能耗设备占比高，能源利用效率低下，低碳修复技术、节能加工技术推广缓慢。此外，绿色再制造技术不成熟，部分高价值零部件因修复技术受限，只能报废处理，资源浪费严重。

(2) 资源循环利用体系不完善，零部件再制造率偏低

航空零部件循环利用是绿色低碳发展的核心抓手，但我国行业内尚未形成完善的资源循环利用体系。一方面，废旧航材回收渠道不畅通，缺乏专业化、规范化的废旧零部件回收、分拣、评估机制，大量退役零部件未得到有效回收，随意丢弃、违规处理现象频发；另一方面，零部件再制造能力不足，再制造技术门槛高、成本高、适航认证严格，多数企业不具备规模化再制造能力，仅能开展简单维修业务，高价值零部件资源浪费问题突出。同时，航材库存管理粗放，行业普遍存在 30%—40% 的过剩库存，加剧资源闲置与损耗。

(3) 运营管理模式粗放，低碳管理体系不健全

多数航空维修企业缺乏绿色低碳管理意识，未建立完善的低碳运营管理体系，管理模式较为粗放。维修流程缺乏低碳优化，维修方案设计未充分考量能耗、环保因素，过度维修、重复维修现象普遍，加剧资源消耗与碳排放；能源管理松散，清洁能源应用比例极低，维修车间、厂房仍以传统化石能源为主，碳排放核算、监测体系缺失，企业无法精准掌握自身碳排放数据，碳减排目标不明确、措施不落地；危废处理不规范，部分企业对维修产生的废溶剂、废涂料、金属废料等危废，未进行分类处理、无害化处置，存在环境污染隐患。

(4) 政策标准体系不健全，行业转型保障不足

相较于欧美成熟的航空绿色维修政策体系，我国航空零部件维修行业绿色低碳相关政策标准仍不完善。缺乏针对性的行业绿色低碳发展规划、碳减排考核标准，对企业的环保约束与激励力度不足；绿色维修技术、再制造零部件的适航认证流程繁琐，认证成本高，制约绿色技术与循环产品的推广；财税、金融等激励政策缺失，企业绿色转型投入成本高、回报周期长，积极性不足；行业绿色低碳评价体系尚未建立，无法对企业绿色发展水平进行精准评估，行业转型缺乏统一标准指引。

(5) 人才与资金支撑薄弱，转型动力不足

绿色低碳维修涉及环保技术、数字化运维、碳管理等多领域知识，行业内专业化绿色维修人才、碳管理人才稀缺，现有维修人员缺乏系统的环保技能培训，难以适配绿色转型需求。同时，绿色技术研发、设备升级、环保改造需要大量

资金投入，中小型维修企业资金实力有限，难以承担高额的转型成本，而绿色转型的经济效益短期难以显现，进一步削弱了企业转型的动力与能力。

2、航空零部件维修行业绿色低碳发展路径探索

2.1 技术革新路径：推广绿色低碳技术，优化维修工艺流程

技术是航空零部件维修行业绿色低碳发展的核心支撑，需聚焦维修全流程，淘汰落后工艺，推广绿色、低碳、高效的维修技术与设备，实现维修工艺的清洁化、节能化升级。

一是推广绿色清洗技术，替代传统化学清洗。重点普及激光清洗、超临界 CO₂ 清洗、等离子清洗等环保清洗工艺，其中超临界 CO₂ 清洗技术可减少 90% 的废水排放，清洗效率提升 50%，无化学残留，适配航空零部件高精度清洗需求；淘汰高污染、高毒化学清洗剂，选用生物基环保清洗剂，降低 VOCs 排放与水体污染，从源头减少污染物产生。

二是优化修复加工与涂装工艺，降低能耗与排放。采用激光熔覆、等离子喷涂、电刷镀等绿色再制造修复技术，提升零部件修复精度与使用寿命，减少报废率；推广节能型维修设备，替换老旧高能耗机床、加热设备，采用变频节能、余热回收技术，提升能源利用效率；涂装环节全面替代高 VOCs 涂料，应用水性涂料、粉末涂料、生物基涂层，广州航新开发的生物基密封胶 VOCs 排放仅为传统环氧涂层的 1/5，且附着力更优，可大幅降低大气污染。

三是深化数字化智能技术应用，赋能低碳维修。依托大数据、AI、数字孪生、AR 辅助维修等技术，搭建智能维修平台，实现故障精准预测、维修方案智能优化，减少过度维修与无效维修；通过数字化管理系统，实现维修流程全程监控、能耗实时监测，精准管控维修环节资源消耗与碳排放，提升维修效率的同时，降低能源与耗材浪费。

2.2 资源循环路径：构建闭环利用体系，提升零部件再制造水平

立足循环经济理念，搭建“回收-评估-再制造-复用”的航空零部件资源闭环利用体系，最大化提升资源利用率，减少原生资源消耗。

一是完善废旧航材回收网络。整合维修企业、航空公司、航材供应商、拆解企业资源，搭建专业化废旧航空零部件回收平台，建立统一的回收、分拣、检测、评估标准，规范回收流程；针对退役飞机，推进精细化拆解，重庆海航航空资源循环利用基地实现飞机拆解回收利用率超 90%，可复用零部件重新进入维修市场，不可复用材料进行资源化提炼，实现变废为宝。

二是提升航空零部件再制造能力。加大再制造技术研发投入，突破高端零部件再制造核心技术，简化再制造零部件适航认证流程，降低认证成本；培育专业化再制造企业，聚焦发动机叶片、起落架、涡轮部件等高价值零部件，开展规模化再制造业务，延长零部件使用寿命；推行航材共享、零

部件租赁模式,优化库存管理,降低过剩库存,提升航材周转效率,减少资源闲置浪费。

2.3 管理优化路径:健全低碳管理体系,实现精细化绿色运营

推动维修企业管理模式从粗放型向精细化、低碳化转型,建立全流程低碳管理体系,强化环保管控,提升运营效率。

一是树立绿色低碳管理理念,建立专项管理机制。企业成立绿色低碳管理部门,明确碳减排目标与责任分工,将环保指标纳入绩效考核;制定绿色维修操作规范,加强维修人员环保技能培训,提升全员低碳意识,推动绿色理念贯穿维修全流程。

二是优化能源管理,推广清洁能源应用。推进维修厂区节能改造,安装智能照明、节能空调、余热回收系统,降低厂区能耗;因地制宜布局太阳能光伏、风能等清洁能源设施,替代传统化石能源,降低能耗与排放。

三是规范危废处理,实现污染物减量化无害化。建立危废分类收集、存储、处理机制,与专业资质机构合作,对废溶剂、废涂料、重金属废料等进行无害化处置;推进废水、废气深度处理,实现达标排放,推行固废资源化利用,将金属加工废料回收提炼,减少废弃物填埋。

四是建立碳排放核算与监测体系。参照国际民航碳核算标准,结合行业特性,搭建企业碳排放核算平台,精准核算维修各环节碳排放数据,制定阶段性碳减排计划,实现碳排放可监测、可管控、可减排。

2.4 产业协同路径:整合产业链资源,推动绿色生态共建

航空零部件维修绿色低碳发展离不开产业链上下游协同,需整合各方资源,构建绿色产业生态,实现协同减排、共赢发展。

一是加强上下游企业协同合作。维修企业与航空公司、航材制造商、拆解企业建立绿色合作联盟,航空公司优先选用绿色维修服务与再制造零部件,航材制造商提供环保型原材料与易维修、可循环的零部件,形成“制造-使用-维修-再制造”的绿色产业链。

二是推动产业集聚发展。打造航空绿色维修产业园区,整合维修、再制造、危废处理、清洁能源供应等资源,实现基础设施共享、污染物集中处理、能源集中供应,降低企业环保改造成本,提升产业集群绿色发展水平。

三是加强国际交流合作。借鉴欧美航空绿色维修先进技术与管理经验,参与国际航空碳减排标准制定,推动国内绿色维修标准与国际接轨;引进国外先进绿色技术与设备,开展技术合作研发,提升行业绿色低碳技术水平,打破国际环保贸易壁垒。

2.5 政策保障路径:完善政策标准体系,强化转型支撑力度

政府层面需加大政策引导与扶持力度,完善政策标准体系,为行业绿色低碳转型提供坚实保障。

一是健全行业绿色低碳政策法规。出台航空零部件维修

行业绿色发展专项规划、碳减排管理办法,明确行业碳减排目标与环保要求,强化企业环保约束;简化绿色维修技术、再制造零部件适航认证流程,降低认证门槛,推动绿色技术与产品规模化应用。

二是加大财税金融激励力度。对绿色技术研发、环保设备购置、清洁能源应用的企业给予税收减免、财政补贴、研发奖励;设立绿色低碳发展专项基金,为中小型维修企业提供低息贷款、融资担保,缓解企业资金压力;对采用再制造零部件、绿色维修服务的航空公司给予运营补贴,激发市场需求。

三是建立行业绿色评价与监管体系。制定航空维修企业绿色低碳评价标准,开展绿色企业认证,树立行业标杆;加强环保监管力度,严查违规排放、危废违规处理等行为,倒逼企业加快绿色转型;搭建行业绿色发展信息平台,推动技术、经验、数据共享,引导行业规范转型。

3、航空零部件维修行业绿色低碳发展典型实践案例

汉莎技术公司作为全球领先的航空 MRO 企业,将绿色低碳理念融入全业务流程,构建了成熟的绿色维修体系。技术层面,全面推广超临界 CO₂清洗、激光修复等绿色工艺,淘汰高污染耗材,大幅降低 VOCs 与废水排放;资源循环方面,建立专业化零部件再制造中心,对发动机叶片、起落架等高价值零部件进行多次再制造,零部件再制造率超 75%,同时优化库存管理,将过剩库存率控制在 10%以内,减少资源浪费;能源管理方面,维修设施全面部署太阳能光伏系统,采用节能暖通、智能照明设备,清洁能源占比超 30%,年能耗降低 25%;碳排放管理方面,建立全流程碳核算体系,制定严苛的碳减排目标,通过工艺优化、能源替代、循环利用等举措,提前完成阶段性碳减排任务,实现环保效益与经济效益双提升。

4、结束语

航空零部件维修行业绿色低碳发展是响应国家“双碳”战略、适配民航绿色转型的必然选择,也是行业提质增效、实现高质量可持续发展的核心路径。当前行业虽具备良好的发展基础,但仍存在绿色技术应用滞后、资源循环利用率低、管理模式粗放、政策保障不足等诸多短板,制约着转型进程。基于循环经济、绿色制造等理论,行业需从技术革新、资源循环、管理优化、产业协同、政策保障五大维度发力,推广绿色低碳维修技术,构建零部件闭环利用体系,健全低碳管理机制,整合产业链资源,完善政策标准支撑,破解转型痛点,实现维修环节能耗、碳排放、污染物排放的全方位降低,推动行业向“安全、高效、低碳、循环”转型。实践表明,航空零部件维修绿色低碳发展兼具可行性与实效性,能够实现生态效益、经济效益与社会效益的有机统一。