

绿色维修技术适配民用航空器适航要求的研究

赵思友 刘栋 谭小亮

深圳航空有限责任公司西安分公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要: 随着全球航空业绿色发展战略的推进与适航标准的持续升级, 绿色维修技术在民用航空器维修领域的应用与适航适配性成为行业研究重点。本文阐述民用航空器绿色维修技术的核心内涵与关键类型, 分析国内外民用航空器适航规章中关于绿色维修的核心要求, 探究绿色维修技术与适航要求的适配路径及现存问题, 并提出针对性优化策略, 旨在为我国民用航空器维修行业的绿色转型与适航合规提供理论参考。

关键词: 民用航空器; 绿色维修技术; 适航要求; 适配性; 航空维修

Research on the Adaptation of Green Maintenance Technologies to Civil Aircraft Airworthiness Requirements

Zhao Siyou, Liu Dong, Tan Xiaoliang

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

Abstract: With the advancement of the global aviation industry's green development strategy and the continuous upgrading of airworthiness standards, the application and airworthiness compatibility of green maintenance technologies in the field of civil aircraft maintenance have become a key focus of industry research. This paper elaborates on the core connotations and key types of green maintenance technologies for civil aircraft, analyzes the core requirements of green maintenance in domestic and international civil aircraft airworthiness regulations, explores the adaptation pathways and existing issues between green maintenance technologies and airworthiness requirements, and proposes targeted optimization strategies. The aim is to provide theoretical references for the green transformation and airworthiness compliance of China's civil aircraft maintenance industry.

Keywords: Civil aircraft; Green maintenance technology; Airworthiness requirements; Adaptability; Aviation maintenance

0 引言

航空运输业的快速发展在推动全球经济一体化的同时, 也带来了能源消耗与环境污染等问题。民用航空器维修作为航空产业链的关键环节, 传统维修模式存在资源浪费、污染物排放超标、能耗过高等弊端, 已无法满足现代航空业绿色发展的需求。绿色维修技术以“节能、降耗、减排、增效”为核心目标, 通过采用环保型材料、优化维修工艺、引入数字化检测手段等方式, 实现航空器维修全流程的环境友好与资源高效利用。

1 绿色维修中的关键技术

1.1 新材料技术

航空业发展的基础就是制造材料, 各国航空业对制造材料的研究都非常重视。选择航空器材料要满足以下需求: 市场供应关系、法律规定、维修成本以及环境可持续性。在航空业应用和维修中多选择轻质高强度材料, 能够减轻飞行器重量, 让飞行能耗更低, 提高飞行器的可靠性, 减少维修次数, 降低维修难度。像熔强化合金元素具有耐损伤、耐腐蚀的特性, 其性价比也较高, 在民用航空器研

发和维修中得到很好的应用; 钛合金相对强度较高, 其抗疲劳寿命长、耐腐蚀性好, 还具有耐高温的特性, 能够和复合材料的强度和刚度进行良好匹配, 是当代航空业主要的结构材料之一, 常常用于制作飞机发动机、压气机、风扇盘叶和叶片等重要部位。

1.2 先进绿色涂层技术

现使用的飞机涂层主要成分是二甲苯及其异构体混合物, 丁醇、异丁醇、甲苯、三甲基苯等有机物, 这些化学物质都具有一定的危害性。现研发出的新型无底层涂层, 逐渐得到应用, 这是一种不需要底漆的涂层材料, 可以减少对人体和环境的危害。具有环保性能的航空涂料不断出现, 比如不含铅的防腐涂料、高固体酚或低挥发性有机化合物涂料以及水性涂料, 这些涂料都不含重金属, 使用性能更佳。除了对涂层材料要求要环保和绿色之外, 涂层技术也要随之更新, 目前所使用的主要有电镀刷技术、高速电弧喷涂技术、喷锌工艺。电镀刷技术是利用电场力的作用让刷镀液中的金属离子覆盖到工件表面并进行还原, 在工件表面形成电镀层, 其设备更加灵活轻便, 镀基速度

较快,对环境的污染很少,具有省水省电,节能降耗的优点。高速电弧喷涂技术是把电弧作为导热源,通过特制喷管喷出高压气体,金属粒子进行雾化,然后再喷涂到工件表面形成致密层,其经济性较好,涂层组织细密,通用性强,使用该技术喷涂后的零部件更耐高温耐腐蚀。采用喷锌工艺来代替传统的高强度钢的镀铬工艺,让隔层硬度更高,更耐腐蚀,同时喷锌工艺的污染更小,环保性更好。

1.3 绿色清洗技术

在飞机维修中的零部件清洗是一项重要的工序,通过去除零部件中的灰尘和杂物,能够增加零部件的使用寿命。现有清洗溶剂可以由乳酸盐成分的溶剂代替,乳酸盐基酯不易挥发,无毒无害,不会破坏臭氧,而且较容易发生生物降解。环保型水基清洗剂,其中的可生物降解型水基清洗剂能够起到脱脂去垢、缓解腐蚀的清洗作用,同时具有较高生物降解性,不会对环境产生污染。

1.4 新材料先进修理工艺

现已研究出新型复合材料的修理技术,比如光固化复合材料修理补片技术、真空辅助树脂转移模塑成型补片修理技术等。光固化复合材料修理补片利用光敏胶固化速度快的特点,用光敏胶作为基础树脂,同时辅以玻璃纤维作为增强材料,根据修复对象要求通过紫外线辐照迅速固化,对裂纹,孔洞,腐蚀,灼伤等形式进行快速修复,这种技术工艺简单、操作方便,而且在修理后不会形成新的应力集中源,适合飞机复合材料的快速修理^[1]。

1.5 CAD 修理技术

计算机辅助设计修理技术已经在飞机设计环节得到应用,现将其应用范围逐渐扩大到维修零部件环节,开始加工零部件之前先进行虚拟现实模拟预装配,再计算干涉分析之后再实际开始加工,能够降低零部件的安装差错,使设计和研发成本,降低,由CAD软件生成的电子图纸可以随时完善修改,减少维修人员的工作量,提高维修效率。

1.6 先进无损检测和评估技术应用

无损检测常用于评估航空器结构的完整性,对其进行不造成损害的检测来确定其定位、损伤、故障等状况。现提出新的绿色无损检测概念,就是在原有不造成破坏的基础上,同时能保证不对材料或结构造成二次污染的无损检测方法,比如计算机摄像射线照相技术、直读式射线照相技术和射线实时成像检测技术,这些新技术能够拍摄到更大的动态范围,具有更灵敏的辐射度,同时对辐射剂量的要求也比较低,曝光时间更短,节约了人力和物力。

1.7 大数据和数字孪生技术

大数据融合包括原始数据集融合、特征集融合和决策集融合,对故障诊断进行评估,同时还可预测各类故障情况,给维修技术人员充足时间,做好配材和维修方案的准备工作,提高维修效率。航空器的数字孪生技术可实现对

结构损伤状态的实时监控,再通过智能算法实现模型的不间断更新,对航空器飞行环境和资源消耗情况进行综合分析,增强剩余寿命的预测能力,通过指导完善任务计划再生需求,优化调度。孪生数字技术主要包括复杂系统建模技术、传感技术和监测技术、动态数据驱动分析和决策技术,共同整合为工具软件平台,帮助决策者了解系统实际运行状态,实现对系统的科学使用和操作,进行更高效率的控制和优化。

2 民用航空器的适航性及其维修管理

2.1 民用航空器适航性

民用航空器适航性是保障航空器飞行安全的核心标准,主要分为初始适航性与持续适航性两类。初始适航性聚焦航空器设计与生产环节,要求整机及各零部件均严格符合国家适航管理部门的标准与规格。持续适航性则针对航空器的全生命周期,指航空器在取得适航审批并交付使用后,直至报废前,通过常态化维修维护,始终保持符合适航要求的运行状态,其达标情况也是验证航空器适航性能的关键指标。

2.2 民用航空器维修管理

维修管理是保障航空器持续适航、安全稳定运行的重要手段,需统筹航空器制造结构、使用规则、维修方式及设计原则等多方面内容。维修与检查工作贯穿航空器整个飞行寿命周期,维修单位需对维修后的航空器开展定期审核,审核合格后方可颁发适航证书,确保航空器合法合规投入使用。航空器在运行过程中,易受自然环境侵蚀、零部件磨损老化等因素影响,出现性能衰退或机械故障,导致实际状态偏离适航标准。而航空器的设计制造质量,会直接决定后期维修的难度与频次,不同设计用途的航空器,需匹配针对性的维修方案。因此,提升适航管理水平与维修技术质量,是保障民用航空器飞行安全的关键举措。

3 绿色维修技术与民用航空器适航要求的适配路径

3.1 优化绿色维修技术的适航审批流程

适航审批流程的优化是提升绿色维修技术适配效率的关键。一方面,适航机构可建立绿色维修技术审批绿色通道,对采用环保、节能型维修技术的方案优先受理、简化审批环节,缩短审批周期;另一方面,维修单位应加强与适航机构的沟通协作,在绿色维修技术研发初期即引入适航审定人员的指导,确保技术方案从设计阶段就符合适航要求,避免后期因不符合适航标准而进行大规模修改。

3.2 强化维修单位的绿色适航管理能力

维修单位作为绿色维修技术的应用主体,其绿色适航管理能力直接影响技术与适航要求的适配效果。一是建立一体化管理体系,将绿色维修管理与适航管理相融合,构建“绿色维修—适航合规”一体化管理流程,确保维修全

流程同时满足绿色环保与适航安全要求；二是加强人员培训，培养既掌握绿色维修技术，又熟悉适航规章的复合型人才，提升维修人员的绿色适航意识与操作能力；三是完善设施设备配置，配备符合适航要求的环保型维修设备与检测仪器，为绿色维修技术的应用提供硬件支撑。

3.3 推动绿色维修技术的适航标准化建设

适航标准化是实现绿色维修技术广泛应用的基础保障。相关行业协会与科研机构应联合适航机构，加快制定绿色维修技术的适航标准，明确不同绿色维修技术的适用范围、技术参数、验证方法等内容^[2]。

4 绿色维修技术适配民用航空器适航要求的现存问题及改善方法

4.1 现存问题

4.1.1 绿色维修与适航管理的协同机制不健全

绿色维修管理与适航管理分属两个不同的管理体系，当前两者的协同机制尚不健全。部分维修单位在开展绿色维修工作时，未充分考虑适航要求，导致维修方案因不符合适航标准而被驳回；而适航机构在制定适航规章时，对绿色维修技术的发展趋势关注不足，规章条款的更新滞后于技术发展，无法为绿色维修技术的应用提供有效的指导。

4.1.2 绿色维修技术的成本与适航效益不平衡

绿色维修技术的研发与应用需要投入大量的资金，如环保型材料的采购成本、数字化检测设备的购置成本等均高于传统维修技术。然而，当前适航规章尚未对采用绿色维修技术的航空器给予明显的运营优惠政策，导致维修单位的绿色维修投入与经济效益不成正比，缺乏主动应用绿色维修技术的动力。

4.1.3 复合型绿色适航人才短缺

绿色维修技术适配适航要求需要既掌握航空维修技术、环保科学知识，又熟悉适航规章的复合型人才。目前，我国航空维修行业此类人才短缺，维修人员的绿色环保意识与适航合规意识有待提升，难以满足绿色维修技术适配适航要求的人才需求^[3]。

4.2 优化方法

4.2.1 完善绿色维修技术的适航验证体系

针对新型绿色维修技术，组织适航机构、科研院所、维修企业联合制定专项适航验证标准，明确验证指标、测试方法与判定准则。建立绿色维修技术适航验证数据库，积累不同技术的验证数据，为后续技术的审定提供参考。鼓励第三方机构参与适航验证工作，提升验证结果的权威性与公正性。

4.2.2 构建绿色维修与适航管理的协同发展机制

建立适航机构与维修单位的常态化沟通机制，定期召开绿色维修技术与适航规章研讨会，及时反馈技术应用中的适航问题，推动适航规章的动态更新。将绿色维修指标纳入航空器持续适航审定的考核体系，强化绿色维修与适航管理的协同联动，实现“技术应用—规章完善—管理升级”的良性循环。

4.2.3 出台绿色维修适航激励政策

适航机构与行业主管部门应出台针对性的激励政策，降低维修单位的绿色维修成本。例如，对采用绿色维修技术且通过适航审定的维修单位，给予资质升级优先、维修方案审批提速等优惠；对使用绿色维修部件的航空器，在航线审批、机场收费等方面给予适当减免，提升维修单位与航空公司应用绿色维修技术的积极性。

4.2.4 加强复合型绿色适航人才培养

高校与职业院校应优化航空维修专业课程设置，增设绿色维修技术、适航规章等相关课程，培养兼具技术与管理能力的复合型人才。维修单位应加强在职人员的培训，邀请适航专家、绿色技术研发人员开展专题讲座，提升维修人员的绿色适航素养。建立绿色适航人才评价与激励机制，吸引更多人才投身于航空绿色维修领域。

5 结语

绿色维修技术是民用航空器维修行业转型升级的必然趋势，而适航要求是绿色维修技术应用的法定底线。实现绿色维修技术与民用航空器适航要求的高效适配，需要从技术验证、流程优化、管理协同、人才培养等多个维度入手，解决当前存在的验证方法不完善、协同机制不健全、成本效益不平衡等问题。随着全球航空业绿色发展战略的深入推进与适航规章的持续完善，绿色维修技术将在民用航空器维修领域得到更广泛的应用，为航空业的可持续发展与航空器的持续适航提供有力支撑。

参考文献：

[1] 王芳丽, 刘凯, 潘微等. 民用航空器结构绿色维修技术应用与发展[J]. 航空学报, 2023,44(11):19-37.

[2] 姬晓冰. 民用航空器持续适航工作管理[J]. 中国科技信息, 2024(6):129-130133.

[3] 葛薇. 民用航空器维修的质量控制研究[J]. 科技创新导报, 2018,15(16):11-13.

作者简介：赵思友（1993.12-），男，陕西西安人，汉族，本科，助理工程师，研究方向：从事民用航空器维修与适航研究。