

民航飞机发动机维修技术浅谈

李 晔

东方航空技术有限公司西北分公司 陕西 西咸新区 712000

摘要：民航飞机发动机维修涵盖基础技术、关键部件维修、检测技术及工艺优化。基础技术涉及拆解组装、清洁与密封，需严格遵循流程与精度要求。关键部件维修针对压气机、涡轮等核心部件，修复损伤并恢复性能。检测技术通过无损检测、状态监测与故障诊断保障结构完整性与性能稳定。工艺优化聚焦增材制造、数字化双胞胎等技术升级，提升维修效率与质量。本文围绕民航飞机发动机维修技术展开系统探讨，为行业提供技术参考与实践指导。

关键词：民航飞机发动机；维修技术；检测技术；维修工艺

引言：在民航运输领域，飞机发动机作为核心动力装置，其性能稳定与否直接关系到飞行安全与运营效率。随着航空技术的持续进步，发动机结构愈发复杂，功能日益强大，这对维修技术提出了更高要求。民航飞机发动机维修技术不仅需要应对日常的磨损与老化问题，还要处理突发故障与潜在隐患。深入探讨发动机维修技术，有助于提升维修水平，保障民航运输的可靠性与安全性。

1 民航飞机发动机维修基础技术

1.1 发动机拆解与组装技术

民航飞机发动机拆解与组装是维修工作的基础环节，对维修人员专业素养与操作精度要求极高。拆解过程需遵循严格层级顺序，从外部附件逐步深入至核心机部件^[1]。维修人员需依据发动机型号与维修手册，明确各部件连接方式与拆卸工具选用标准。例如，特定型号发动机的压气机叶片采用特殊锁紧结构，需使用专用扳手按特定角度旋转解锁，避免强行拆卸导致叶片或轮盘损伤。组装环节对精度控制更为严苛。部件对中调整需借助激光校准仪等高精度设备，确保涡轮轴与压气机轴同轴度误差控制在微米级范围内。间隙控制是组装关键，燃烧室喷嘴与火焰筒间隙、涡轮叶片叶尖与机匣间隙等参数直接影响发动机性能与安全性。维修人员需通过塞尺测量、光学投影仪检测等手段，将间隙调整至设计允许范围内。扭矩校准同样不容忽视，螺栓紧固需使用数显扭矩扳手，按手册规定顺序与力矩值分阶段拧紧，防止因扭矩不均导致部件变形或密封失效。

1.2 发动机清洁技术

发动机清洁是保障性能稳定的重要手段。化学清洗通过专用溶剂溶解油污与积碳，需根据部件材质选择清洗剂类型与浓度。高温合金部件适用弱碱性清洗剂，避免强酸腐蚀；复合材料部件则需采用中性清洗剂，防

止材料性能退化。清洗过程需控制温度与时间，防止部件因热应力或化学侵蚀产生损伤。干冰清洗作为新型技术，利用固态二氧化碳升华产生的微爆效应去除污垢，具有无残留、无磨损优势，适用于精密部件清洁。高压水射流清洗通过高压水流冲击剥离污垢，需调节压力与流量以适应不同清洁需求，避免高压损伤部件表面涂层。

1.3 发动机密封技术

密封技术直接关系发动机运行安全与效率。气路密封通过橡胶密封圈、金属密封环等实现，需根据工作温度与压力选用密封材料。高温区域采用氟橡胶或硅橡胶密封圈，低温区域则选用丁腈橡胶。金属密封环通过弹性变形填补间隙，需控制预紧力防止过度压缩导致密封失效。油路密封依赖密封胶与密封垫片，需确保密封面平整度与清洁度。液压系统密封需定期检测密封件老化程度，及时更换出现裂纹或变形的密封件。动态密封如轴端密封，采用迷宫密封或碳环密封结构，通过特殊设计阻止润滑油泄漏与外部杂质侵入，保障发动机长期可靠运行。

2 民航飞机发动机关键部件维修技术

2.1 压气机维修技术

压气机作为发动机核心部件，承担着空气压缩与流量调节重任。叶片维修是压气机维护重点，长期运行易导致叶片表面出现磨损、裂纹或变形。维修人员需借助孔探仪与三维扫描设备，对叶片损伤程度进行精确评估^[2]。针对轻微磨损，采用激光熔覆技术修复表面涂层，恢复叶片抗腐蚀与耐磨性能；对于深度裂纹，需依据裂纹走向与部件应力分布，制定针对性修复方案，必要时进行叶片更换。轮盘维修需关注轮缘磨损与轮盘裂纹，通过超声波探伤检测内部缺陷，采用电子束焊接或摩擦焊接技术修复轮盘结构，确保轮盘强度满足设计要求。静子叶片维修则侧重于角度调整与间隙控制，通过光学投影仪

检测叶片安装角度,使用塞尺测量叶片与机匣间隙,确保压气机气动性能稳定。

2.2 涡轮维修技术

涡轮部件长期处于高温高压环境,维修需应对热腐蚀、氧化与蠕变等复杂问题。涡轮叶片维修需先进行无损检测,识别叶片表面裂纹与内部缺陷。对于热端部件,采用等离子喷涂技术修复热障涂层,提升叶片耐高温性能;针对叶片边缘损伤,运用激光切割与精密磨削技术进行修复,恢复叶片气动外形。涡轮盘维修需检测盘心裂纹与轮缘变形,通过磁粉探伤与荧光渗透检测发现微小缺陷,采用电子束焊接或惯性摩擦焊技术修复盘体结构,确保涡轮盘在极端工况下保持结构完整性。

2.3 燃烧室维修技术

燃烧室维修聚焦于积碳清除与结构完整性维护。积碳会降低燃烧效率并引发局部过热,需采用化学清洗与干冰清洗相结合的方式去除积碳。化学清洗选用专用溶剂溶解积碳,干冰清洗利用固态二氧化碳升华产生的微爆效应剥离顽固污垢,避免对燃烧室基体材料造成损伤。结构完整性检测需关注火焰筒裂纹与冷却孔堵塞,通过荧光渗透检测发现表面裂纹,使用高压空气吹扫冷却孔,确保燃烧室冷却效果。

2.4 风扇维修技术

风扇部件维修侧重于叶片损伤修复与动平衡调整。叶片损伤多由外来物撞击或疲劳引起,需根据损伤程度选择修复方式。轻微损伤采用手工打磨与喷涂修复,严重损伤则需更换叶片。动平衡调整通过在叶片上加装配重块,消除风扇运转时的不平衡力矩,确保风扇振动水平符合标准。

2.5 燃油与润滑系统维修技术

燃油系统维修需检测燃油泵磨损、喷嘴堵塞与管路泄漏。燃油泵维修需解体清洗,更换磨损齿轮或轴套,恢复燃油输送能力;喷嘴维修采用超声波清洗去除积碳,确保燃油雾化效果;管路维修需检测接头密封性,更换老化密封件,防止燃油泄漏引发安全隐患。润滑系统维修关注滑油泵效率、滑油滤堵塞与轴承润滑状态^[3]。滑油泵维修需校准泵体间隙,恢复滑油输送压力;滑油滤维修需定期更换滤芯,防止杂质进入轴承腔;轴承润滑状态检测通过油样分析判断磨损程度,及时补充或更换滑油,延长轴承使用寿命。

3 民航飞机发动机维修检测技术

3.1 无损检测技术

无损检测技术是民航飞机发动机维修中保障结构完整性的核心手段。超声检测凭借高频声波在材料内部传

播时的反射特性,精准定位内部裂纹与疏松缺陷,尤其适用于涡轮盘、压气机轮盘等厚截面部件的深层检测。检测时通过调整声波频率与耦合剂类型,可适应不同金属材料的声阻抗差异,确保缺陷回波信号清晰可辨。射线检测利用X射线或 γ 射线的穿透能力,对叶片、机匣等薄壁部件进行透照成像,通过分析底片上缺陷的阴影形态与密度变化,判断裂纹走向与气孔尺寸,为修复方案制定提供依据。磁粉检测针对铁磁性材料表面及近表面缺陷,通过磁化部件使缺陷处形成漏磁场,吸附磁粉形成可见痕迹,适用于压气机叶片、轴承套等部件的快速筛查。涡流检测基于电磁感应原理,对导电部件表面缺陷进行非接触式检测,通过分析涡流变化引起的阻抗差异,识别裂纹、磨损等损伤,常用于燃油管路、滑油管路等部件的定期检测。

3.2 状态监测技术

状态监测技术通过实时采集发动机运行参数,实现性能退化趋势预测。振动监测系统安装在发动机关键部位布置加速度传感器,持续采集振动信号,通过频谱分析识别转子不平衡、轴承磨损等故障特征频率。油液监测技术定期采集滑油样本,分析金属颗粒浓度、黏度变化等指标,结合铁谱分析技术观察磨损颗粒形态,判断齿轮、轴承等部件的磨损状态。温度监测系统利用热电偶或红外测温仪,实时监测涡轮前温度、滑油温度等关键参数,通过温度场分布分析发现局部过热区域,预防热端部件热腐蚀或烧蚀问题。性能参数监测系统集成发动机电子控制器(EEC)数据,跟踪推力、燃油流量、排气温度等参数变化,建立性能退化模型,为维修周期调整提供数据支持。

3.3 故障诊断技术

故障诊断技术融合多源信息实现故障精准定位。数据驱动诊断方法利用飞行参数记录仪(FDR)与发动机健康管理系统(EHMS)采集的海量数据,通过机器学习算法训练故障分类模型,实现振动异常、性能衰减等故障的自动识别。物理模型诊断方法构建发动机气动热力学模型,将实时监测参数与模型预测值对比,通过残差分析定位故障部件,适用于压气机喘振、燃烧室熄火等复杂故障诊断。专家系统诊断方法整合维修手册知识库与历史故障案例,通过规则推理引擎模拟专家决策过程,为维修人员提供故障隔离与修复建议,缩短故障排查时间。多技术融合诊断策略将振动分析、油液分析、温度监测等多维度数据进行关联分析,通过故障特征交叉验证提高诊断准确性,避免单一技术误判风险。

4 民航飞机发动机维修工艺

4.1 维修流程规范

民航飞机发动机维修流程规范是保障维修质量与安全的核心框架。维修前需依据发动机型号与维修等级制定详细作业计划,明确各阶段任务节点与质量标准。部件拆卸环节遵循“先外后内、先易后难”原则,按照维修手册规定的顺序与扭矩要求逐步操作,对关键连接部位做好标记与记录,防止装配错位^[4]。清洗阶段根据部件材质与污染类型选择清洗方法,金属部件采用化学清洗与超声波清洗结合,复合材料部件则使用中性溶剂手工擦拭,避免化学侵蚀导致材料性能下降。检测环节综合运用无损检测、性能测试等技术手段,对部件裂纹、磨损、变形等缺陷进行全面筛查,确保缺陷定位精度与检测覆盖率符合标准。修复阶段针对不同损伤类型采用差异化工艺,表面损伤通过喷涂、堆焊等工艺恢复尺寸精度,结构损伤则运用焊接、粘接等技术实现强度再生。装配环节严格控制环境条件,在恒温恒湿车间完成精密部件对接,通过激光校准仪确保同轴度误差小于0.02毫米,使用数显扭矩扳手按手册规定力矩分阶段拧紧螺栓,防止因装配应力导致部件变形。维修后需进行整机磨合测试,模拟实际工况验证发动机性能参数,确保推力、燃油消耗率等指标达到适航标准。

4.2 维修工具使用技术

维修工具使用技术直接影响维修效率与精度。专用拆装工具设计需贴合部件结构特征,如涡轮叶片拆装工具采用可调式卡爪结构,通过旋转调节螺杆实现不同尺寸叶片的精准夹持,避免强行拆卸导致叶尖损伤。测量工具选用需匹配检测精度要求,千分表用于测量轴向间隙,量程0-3毫米、分辨率0.001毫米;激光对中仪用于转子同轴度检测,测量范围 ± 5 毫米、精度 ± 0.005 毫米。清洗设备配置需考虑部件清洁度等级,高压水射流清洗机压力可调范围0-150兆帕,适用于机匣等大型部件去污;超声波清洗机频率28-40千赫,可清除叶片微孔内残留污垢。无损检测设备操作需专业资质认证,涡流检测仪需根据部件导电率选择探头频率,磁粉检测机需控制磁化电流强度确保漏磁场强度达标。数字化工具应用日益广泛,孔探仪配备高清摄像头与图像处理软件,可对燃烧室内部缺陷进行三维重建与尺寸测量;AR辅助维修系统通过智能眼镜投射维修指引,实时显示部件拆装顺序与扭矩要求,降低人为操作失误风险。

4.3 维修工艺优化方向

维修工艺优化聚焦于技术升级与模式创新双重维度。增材制造技术为复杂部件修复开辟新路径,通过选择性激光熔覆工艺在涡轮叶片表面沉积特殊合金涂层,不仅可修复热腐蚀损伤,更能提升材料耐高温性能,修复层与基体形成冶金结合,显著提高修复质量。数字化双胞胎技术构建发动机虚拟模型,集成运行数据、维修记录与环境参数,通过仿真分析预测部件劣化趋势,实现从定期维修向状态维修的转型,减少非计划停场时间。智能检测系统融合多模态传感技术,运用深度学习算法自动识别缺陷类型与严重程度,检测效率较传统方法大幅提升,同时降低对操作人员经验依赖。绿色维修工艺注重环境友好性,水基清洗剂替代有机溶剂减少挥发性有机物排放,干冰清洗技术实现无残留清洁,废旧部件再制造工艺通过表面强化处理恢复性能,延长部件使用寿命,降低全生命周期成本。维修模式创新方面,推行模块化维修策略,将发动机分解为独立功能模块,通过更换模块快速恢复发动机可用性,缩短维修周期;探索远程维修支持,利用5G通信技术实现专家实时指导,提升一线维修人员技术能力。

结束语

民航飞机发动机维修技术是保障飞行安全与运营效率的关键支撑。从基础技术到关键部件维修,从检测技术到维修工艺优化,各个环节紧密相连、相辅相成。不断发展和完善的维修技术,能够有效应对发动机运行过程中的各类问题,确保发动机始终处于良好的工作状态。持续推动维修技术的创新与进步,将为民航事业的稳定发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]王志东,陆越.检索增强生成技术在民航维修领域的应用[J].航空维修与工程,2026(3):50-54.
- [2]柴兆延,马鹏,杨明,等.民航飞机发动机吊挂结构优化设计策略[J].中国航班,2023(2):58-61.
- [3]李智夫.状态监控技术的民航发动机维修与管理的分析[J].百科论坛电子杂志,2021(8):433.
- [4]李鹏涛,左洪福,肖文,等.航空发动机叶片损伤及其修复技术研究及展望[J].航空学报,2024,45(15):132-159.