

文章编号: 1674-8190(2023)05-029-06

航空发动机维修技术进展与展望

侯廷红, 周平, 何黎明, 韩昌富
(国营川西机器厂 科研生产部, 成都 611936)

摘要: 航空发动机是为航空装备提供动力的装置, 维修是保障发动机完成服役周期的重要阶段。随着航空发动机维修产业的不断发展, 为满足未来大批量、高质量、高效率的维修需求, 发动机维修技术也在不断提升和发展。本文简要介绍了航空发动机维修发展历史; 从故障检查、整机清洗和整机装配三个方面综述了航空发动机整机维修技术的研究进展, 从再制造发展、关键技术和技术开发流程三个方面阐述了航空发动机再制造进展; 并对航空发动机维修和再制造技术的未来发展进行了展望。

关键词: 航空发动机; 维修技术; 进展; 展望

中图分类号: V267.3

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.05.04

Research progress and prospect of aero-engine maintenance technology

HOU Tinghong, ZHOU Ping, HE Liming, HAN Changfu
(Research and Production Department, State-owned Chuanxi Machine Factory, Chengdu 611936, China)

Abstract: Aero-engine is a device that provides power for aviation equipment. Maintenance is an important stage in ensuring that the engine completes its service cycle. With the continuous development of the aero-engine maintenance industry, aero-engine maintenance technology is also constantly improved to meet the future demand for large-scale, high-quality, and efficient maintenance. The development history of aero-engine maintenance is introduced briefly. This article summarizes the research progress of aero-engine maintenance technology from three aspects: fault inspection, machine cleaning, and machine assembly. It elaborates on the progress of aircraft engine remanufacturing from three aspects: remanufacturing development, key technologies, and technological development processes; and the future development of aero-engine maintenance and remanufacturing technology was prospected.

Key words: aero-engine; maintenance technologies; progress; prospect

收稿日期: 2023-03-31; 修回日期: 2023-10-10

通信作者: 侯廷红, christmaseve73@163.com

引用格式: 侯廷红, 周平, 何黎明, 等. 航空发动机维修技术进展与展望[J]. 航空工程进展, 2023, 14(5): 29-34, 60.

HOU Tinghong, ZHOU Ping, HE Liming, et al. Research progress and prospect of aero-engine maintenance technology[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(5): 29-34, 60. (in Chinese)

0 引言

航空发动机是飞机核心部件,其性能直接影响飞机的服役行为和工作可靠性,发动机全寿命周期中维修保障占发动机整体花费的50%以上。维修是航空全产业链中不可或缺的重要一环,是飞机使用的前提和必要条件。从全球航空维修业的发展态势看,我国目前还处在相对落后的水平,与我国航空大国的地位不相称。航空发动机维修是指对航空发动机进行维护和修理,为保持、恢复和改善航空发动机规定技术状态而进行的全部活动。航空发动机维修的主要流程包括分解、故检、修理、装配、试车五个主要环节,其中故检、修理和装配环节对发动机修理质量有着至关重要的影响^[1]。随着发动机技术指标的不断提升,对发动机零部件可靠性、零部件之间配合与单元体之间的配合精度等要求也越来越高^[2]。而发动机在飞行服役后,零部件自身几何尺寸、结构完整性和零部件之间的配合特征量都会发生不同程度的变化。因此,需要依靠发动机维修作业,采取不同的技术手段使发动机零部件本身及其之间的配合特征恢复到设计要求的水平。

随着航空发动机维修产业的不断发展,为满足未来大批量、高质量、高效率的维修需求,发动机维修技术也在不断提升和发展。本文首先概述航空发动机维修发展历史,然后对航空发动机整机维修和再制造关键技术的发展现状进行分析,最后以技术发展需求为牵引,对航空发动机维修技术的未来发展进行展望。

1 航空发动机维修发展简介

航空发动机维修发展经历了三个历史时期:1) 20世纪30年代以前,形成了航空发动机维修基本概念和维修专门技术;2) 第二次世界大战至20世纪50年代末,形成了相对独立、完整的航空发动机维修系统;3) 20世纪60年代至今:形成了一门多专业、多层次的综合性工程技术学科。

按照维修触发机制、决策支持和维修技术将航空发动机维修分为修复性维修、预防性维修和预测性维修。1) 修复性维修是以航空发动机是否完好或是否能用为依据,在航空发动机发生故障或停机后再恢复其原始状态的被动式维修,属非

计划性维修;2) 预防性维修是以时间为依据的计划或定时维修,按规定的时间间隔或工作循环数进行检查、分解和更换零部件,包括大修、中修、小修等不同维修级别;3) 预测性维修是以状态为依据的维修,通过定期或连续状态监控和故障诊断,判定航空发动机所处状态,预测状态的发展趋势和剩余工作寿命,提前制定维修决策,开展主动式维修。

2 航空发动机整机维修技术

在航空发动机维修过程中,首先将发动机分解至零部件,然后对零部件进行故障检查,根据零部件实际技术状态制定修理方案并将其技术状态恢复到设计水平,最后完成装配和试车。其中,发动机整机维修关键技术主要涉及故障检查、整机清洗和装配技术。

2.1 发动机故障检查技术

故障检查是指在发动机分解状态下,综合采用目视检查、尺寸测量和无损检测等手段对零部件的表面损伤、基体损伤、内部缺陷、形位尺寸等进行检测识别。对零部件形位尺寸检测,主要使用三坐标等测量设备进行测量^[3],近年来为了满足快速高效测量的需要,非接触式光学测量技术在形位尺寸检测中得到了广泛应用^[4-5]。

通常,故障检查不仅要检查对零部件的损伤故障进行检查和诊断,还包括如下四項工作:1) 对零部件的故障信息进行记录和统计,形成故障数据库;2) 针对零部件的故障下发修理作业工卡;3) 提出零部件修理过程中的备件需求;4) 对零部件的修理质量记录进行审核。因此,故障检查是航空发动机维修的中心。换言之,航空发动机维修是以故障检查为中心,以信息化为手段,技术状态和寿命管理为核心的全寿命过程。

2.2 发动机整机清洗技术

整机清洗在保持航空发动机性能及运行可靠性方面发挥着重要的作用。在航空发动机工作过程中,随着使用时间和循环的增加,其内部气路部件会附着粉尘、油污、积碳、氧化物、腐蚀产物等污染物,导致发动机性能衰退。通过对发动机进行定期清洗,可以改善因内部流道零部件表面附着污染物导致的整机性能下降问题。

航空发动机整机清洗方式是多种多样的。清洗服务供应商一般会采用喷洒去离子水、加热水、雾化/喷雾、浸没、超声波以及其他更加符合环保要求的设备和清洗介质(比如干冰)来清洗航空发动机内部流道表面,在一定程度上可以恢复叶片原有的气动外形,提高发动机的效率^[6-7]。整机清洗产品包括便携式手动设备、转盘式清洗系统、带式清洗机、传送带清洗机以及具有机器人集成的自动化系统。

2.3 发动机装配技术

装配作为航空发动机试车前的最后一个环节,装配过程的质量直接影响发动机整机特性表现。发动机装配技术涉及几何误差传递机理、表面接触力学特性演变机理等多学科耦合特征,同时还包含先进检测技术、自动化辅助工装设备、数字化装配软件系统等的的应用。数字化装配产线实施技术路线如图 1 所示。

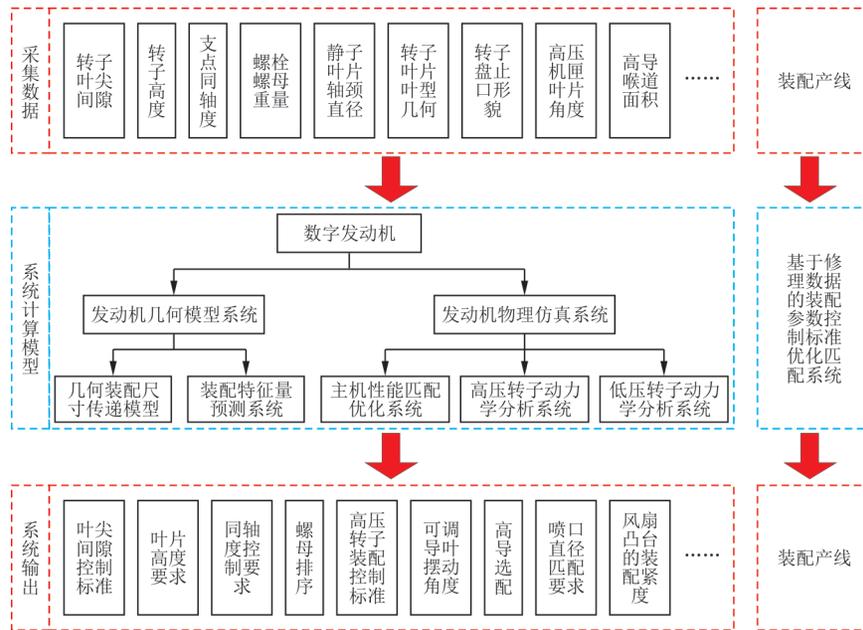


图 1 数字化装配产线实施技术路线

Fig. 1 Implementation technical route of digital assembly production line

欧美发达国家在航空发动机零部件关键几何/物理特征参数检测、自动装配工艺等方面比我国具有更高的数字化水平,主要表现在:首先是航空发动机装配专用工艺装备研发和工程化应用进展显著,比如:深入转子内腔的多自由度螺母拧紧机器人、基于上部运输的多条脉动式发动机总装生产线等已经投入使用;其次是整机装配现场大量应用先进通用设备,比如:具有无线数据传输和实时报警功能的高精度电动拧紧枪、用于发动机外部结构检测的光学机器人、气动助力臂等。近年来,国内航空发动机领域在装配自动化、数字化方面也取得了一定的进展,如盲腔螺栓自动拧紧机器人、多自由度装配平台、上部运输脉动产线、AGV、助力臂,或者使用标准关节臂机器人选配执行器或检测仪,可完成三维几何形貌、重量、重量矩、固有频率等参数批量检测的叶片综合检测仪

等设备陆续投入使用。

航空发动机整机装配技术主要涉及核心机装配、低压转子对接装配、机匣装配等核心环节。

1) 核心机装配

发动机核心机装配主要是保证核心机转子同轴度及螺栓连接的质量稳定性。针对转子装配同轴度控制,近年来国内诸多研究人员开展了堆叠优化理论研究^[1-2],通过优化转子安装相位控制转子同轴度水平;在此理论基础上,国内外开发了多款堆叠优化设备,如美国泰勒公司的SPS等。

转子连接稳定性方面目前还处于探索研究阶段,研究热点集中在螺栓预紧力测量、止口界面贴合刚度检测等方面。同时,由于多数转子为过盈止口的连接方式,装配时会采用液氮冷却或保温炉加热方式进行装配;考虑到温度变化引起的变形以及过盈止口的挤压作用,转子压装技术也是

研究的热点之一,部分航空发动机制造维修企业已经在尝试产品应用。目前国内大连理工大学、上海交通大学、北京航空航天大学等针对螺栓预紧力测量、螺栓自动拧紧设备、转子转配后连接界面接触刚度检测等方面开展了一些研究工作^[1-2,8]。界面接触刚度测量系统如图 2 所示。



图 2 转子界面连接刚度测试系统

Fig. 2 Testing system for interface connection stiffness of rotors

2) 机匣装配

机匣装配与转子装配原理基本类似,都是通过过盈止口或法兰安装边完成各级机匣装配。目前工程应用方面主要是通过边装边测的方式来保证机匣装配同轴度,但是这种方式容易造成返工,影响维修周期。国内针对机匣数字化虚拟装配方面开展了大量研究工作^[9-10],通过对机匣安装边实际测量得到的各类几何参数进行处理,实现整体同轴度预测。

3) 低压转子对接装配

低压转子对接装配主要分为垂直装配与水平装配两种。垂直装配通过行车将低压涡轮转子吊起,利用转子自重将低压涡轮轴穿过核心机,与风扇转子进行对接。这种方式主要应用在小涵道比涡扇发动机或涡喷发动机的整机装配上。大涵道比涡扇发动机低压涡轮转子与风扇转子对接主要是通过水平对接实现^[10-11],水平对接装配技术已经在商用大涵道比涡扇发动机低压转子装配中得到了广泛应用。

2.4 发展展望

航空发动机整机维修技术的未来发展方向主要包括如下三个方面:

1) 针对装配过程繁杂、工艺参数要求精准度高、时效性强的装配工序,从目前的主要依靠人工操作、经验为主的装配模式向自动化、数字化装配

模式转型是未来发展的趋势之一;与人工装配为主的模式相比,自动化装配设备或工装可以有效提高装配过程的质量稳定性,进而确保装配质量不随人为经验的差异而波动。

2) 装配工艺参数定制化优化设计能力提升是未来发动机装配方向发展的必然趋势之一,通过开发定制的工业软件,针对零组件实际的技术状态进行装配工艺参数控制标准优化,做到单台标准精准控制模式,提高一次装配试车合格率。

3) 装配工序小闭环质量检测能力的提升也是未来航空发动机装配能力提升的主要研究方向之一,通过研发针对单工序装配质量检测的设备或工具,控制每个装配工序的装配质量以达到整机装配质量控制的目的。

3 航空发动机再制造技术

航空发动机的工作特点是“三高一长”,即高温、高压、高转速、长期循环往复工作。严苛的工作条件和高可靠性要求决定了航空发动机维修技术的高难度和高要求。以涡轮转子叶片等为代表的航空发动机关键重要零部件是维修的重点和难点。目前国内军用航空发动机基本具备自主维修保障能力,但民用航空发动机由于关键修理技术缺失,关键重要零部件大多送往国外修理。

相对于按照航空发动机修理手册进行的常规修理而言,再制造是对超出修理手册的故障损伤进行高技术修复并实现再生使用,既是维修发展的高级阶段,又是绿色制造和智能制造。

3.1 再制造简介

再制造是指对直接危及或影响飞行安全的损伤零部件进行专业化修复的批量化生产过程。再制造零部件应达到与原有新品相同的质量和性能,满足发动机设计使用要求。再制造起源于 20 世纪 70 年代欧洲和美国在军用和民用航空发动机关键件修复和强化技术研究,在对环境污染最小、投入费用最少和资源利用率最高的前提下实现废品再用、旧品新用、低寿长用,具有低能耗、低污染、低排放的特征,符合可持续发展战略和发展低碳、循环、生态经济的要求。

航空发动机再制造不同于普通维修,主要差异包括:1) 维修对象是故障零件或到了规定工作

时限的零件,再制造对象是超出发动机修理手册损伤、报废或停修的零件;2) 维修是按照修理手册规定的技术标准进行修理,再制造是超出修理手册规定的技术标准的修理;3) 维修后的零件在质量和性能上难以达到新品水平,再制造后的零件在质量和性能上可达到甚至超过新品水平,同时可解决原结构设计制造存在的缺陷,提高其工作可靠性。

3.2 再制造关键技术

再制造技术已经发展成为多学科、多专业、多领域的高、精、尖技术交叉集成的高新技术。目前再制造理论还在不断发展、丰富和完善中,尚未形成一套完整、成熟、科学的理论体系。航空发动机零部件再制造包括以前处理、表面完整性修复、性能及形变恢复、后处理、寿命预测评价及考核验证和在役再制造为核心的关键技术群^[11-19]。

1) 前处理技术:采用水基清洗、碳氢清洗、化学酸洗、氟离子清洗等化学方法,高压水射流、激光清洗、水吹砂等物理方法对零件表面油污、氧化、腐蚀等污染层和原始涂层进行清理,为后续修理提供清洁表面。以涡轮导向叶片为例,可分别采用高压水射流、化学酸洗和氟离子清洗去除热障涂层陶瓷面层、金属粘接层和裂纹内部表面致密稳定氧化物。目前的发展趋势是局部去除需修复区域的涂层后再局部恢复涂层,以减少整体去除涂层对叶片型面及厚度的影响。

2) 表面完整性修复技术:综合采用熔焊、高能束增材、真空钎焊、冷/热喷涂、物理气相沉积等技术修复零部件服役损伤和恢复表面完整性。以涡轮转子叶片为例,其叶尖裂纹和磨损可采用高温预热特殊熔焊、激光增材修复、等离子焊接、真空钎焊等技术进行修复,其损伤脱落涂层可采用多弧离子镀、化学气相沉积、电子束—物理气相沉积等技术重新制备。再以压气机整体叶盘叶片损伤为例,可根据叶片损伤区域大小和严重程度分别采用激光增材修复、电子束或等离子补片焊接、线性摩擦焊接等技术进行修复。目前修复技术的发展趋势是集成化、精准化、自动化、智能化,即综合采用多种技术实现对零件损伤的高效精准修复。

3) 性能及形变恢复技术:采用恢复热处理、热等静压、冷/热校形、蠕变校形等使零件的组织性

能和型面尺寸符合设计要求。以涡轮转子叶片为例,其组织性能衰退可采用特殊热处理技术进行恢复,其蠕变损伤可采用热等静压技术修复,关键在于选择特殊热处理时机和蠕变阶段。对于定向凝固和单晶涡轮转子叶片而言,在修复过程中还需预防和控制再结晶。

4) 后处理技术:采用数控加工、机械手磨抛、喷丸强化、激光冲击强化、振动光饰、电火花加工、激光打孔等技术恢复再制造零部件的型面尺寸、表面应力状态及疏通堵塞的冷却通道。以压气机转子叶片为例,可采用数控加工或机械手磨抛恢复型面尺寸,采用喷丸强化或激光冲击强化恢复表面应力状态,采用振动光饰获得所需表面光洁度。

5) 寿命预测评估及考核验证技术:评估再制造零部件的剩余工作寿命和考核验证再制造技术的可靠性。针对时限件,应预测评估零部件再制造后的剩余工作寿命,同时采用包括材料级(含基体—修复区界面)、工艺试样级(包括静态和动态力学性能)、样件级(比如超温超转、振动疲劳、燃气热冲击等试验)和整机级(比如持久试车和加速试车)在内的四个层次的考核验证来保证再制造技术可靠性和零件修复质量。

6) 在役再制造技术:主要包括发动机健康能效监测、损伤虚拟仿真、基于大数据与云计算的状态监控、复杂工况自适应等关键技术。

3.3 再制造技术开发流程

航空发动机零部件再制造技术开发流程一般包括再制造性评估、再制造设计、再制造技术开发、再制造技术验证和再制造生产五个阶段。再制造性评估是对具有再制造价值的零部件,通过故障检查和无损探伤确定其故障情况后,从技术、经济、资源和环境等方进行评估;经过再制造性评估后,根据零部件的结构、功能、材料、工况、修理历史等信息,设计再制造极限、选择再制造工艺及其应达到的标准;再制造技术开发是针对零部件故障损伤,采用试验设计方法,研究前处理+再制造+后处理的成套工艺技术;再制造技术验证是对再制造后的零件在真实或模拟工况环境下考核其耐久性和功效性;再制造生产是在完成再制造技术鉴定和审批后进行批量生产。

3.4 发展展望

航空发动机再制造技术的未来发展方向主要包括四个方面:

1) 绿色:遵循“绿色化、减量化、再循环、再利用”的原则,研发应用绿色技术;

2) 智能:研究应用智能再制造技术,提高生产率、提升产品质量和降低能源消耗;

3) 精益:以精益思想为指导,综合运用各种再制造技术,发现和消除再制造中的浪费,创造更多的再制造价值;

4) 高效:在物联网、云计算和大数据环境下,提供快速高效再制造方案,实现产品效益最大化。

4 结束语

未来先进航空发动机将朝着高推力、高可靠性、高安全性、良好维护性、低使用成本的方向发展,同时大量采用单晶高温合金、金属间化合物、复合材料等新材料,整体叶盘、双性能粉末冶金盘、整体叶环等新结构,3D 打印、线性摩擦焊接等新工艺。随着新材料、新结构、新工艺的不断应用,对航空发动机维修提出了新的、更高的专业性要求,将推动航空维修向着数字化、自动化、智能化、精益化和绿色化等方向发展。航空发动机装配技术将逐步从目前基于经验装配模式向工艺控制标准个性化、装配过程工艺控制精准化、装配操作自动化、装配质量检测小闭环的方向发展,航空发动机检测技术将由目前的粗放式、定性式检测向精细式、量化检测方向发展。同时,针对航空发动机整机状态的无损检测和柔性孔探检测也是发展趋势之一。

参考文献

- [1] 赵罡,李瑾岳,徐茂程,等. 航空发动机关键装配技术综述与展望[J]. 航空学报, 2022, 43(10): 527484.
ZHAO Gang, LI Jinyue, XU Maocheng, et al. Research status and prospect of key aero-assembly technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(10): 527484. (in Chinese)
- [2] 张渝,李琳,陈津,等. 航空发动机重要装配工艺分析及发展前景[J]. 航空制造技术, 2019, 62(15): 14-21.
ZHANG Yu, LI Lin, CHEN Jin, et al. Research current status and prospect on aero-engine assembly process technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(15): 14-21. (in Chinese)
- [3] 于富侃. 复杂曲面接触/非接触耦合测量技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
YU Fukan. Research on contact/contactless measurement technology of complex surface [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [4] 龙智,郑琪,张天辉,等. 基于线激光扫描的航空发动机叶片非接触式检测研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9): 50-53.
LONG Zhi, ZHENG Qi, ZHANG Tianhui, et al. Research on noncontact detection of aeroengine blade based on linear laser scanning [J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(9): 50-53. (in Chinese)
- [5] 王丽明,辛朝阳,陈强. 无损检测在航空维修中的应用研究[J]. 科技创新与应用, 2022(24): 170-173.
WANG Liming, XIN Chaoyang, CHEN Qiang. Non-destructive testing application in aviation maintenance [J]. Technology Innovation and Application, 2022(24): 170-179. (in Chinese)
- [6] 佟艳群,马健,上官剑锋. 航空航天材料的激光清洗技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(11): 48-56, 69.
TONG Yanqun, MA Jian, SHANGGUAN Jianfeng. Research progress of laser cleaning technology for aerospace materials [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(11): 48-56, 69. (in Chinese)
- [7] 郑建林,王友涛,栗娜娜,等. 干冰射流技术清洗航空发动机积碳[J]. 航空动力, 2022(12): 72-74.
ZHENG Jianlin, WANG Youtao, LI Nana, et al. Dry ice jet technology for aero engine carbon deposition washing [J]. Aerospace Power, 2022(12): 72-74. (in Chinese)
- [8] WANG J, SUN Q, YUAN B. Novel on-machine measurement system and method for flatness of large annular plane [J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(1): 015004.
- [9] 李小强,李兆宇,孟庆阔,等. 一种航空发动机机匣数字化假装质量预测方法: 202110358678. 7[P]. 2022-11-11.
LI Xiaoqiang, LI Zhaoyu, MENG Qingkuo, et al. A method of aerogine virtual assembly quality prediction: 202110358678. 7[P]. 2022-11-11. (in Chinese)
- [10] 刘浩,任家海,范明争,等. 航空发动机低压涡轮主单元体水平装配方法及装配系统: 202110258548. 6[P]. 2022-09-13.
LIU Hao, REN Jiahai, FAN Mingzheng, et al. Aeroengine LPT module horizontal assembly and assembly system: 202110258548. 6[P]. 2022-09-13. (in Chinese)
- [11] ARJAKINE N, BRUCK J, NANCY W J, et al. Advanced weld repair of gas turbine hot section components[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air. [S.l.: s. n.], 2008: 51534-51547.
- [12] YILMAZ O, GINDY N, WINDDY S Y, et al. A repair and overhaul methodology for aeroengine components [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26: 190-201.
- [13] GAO Jian, CHEN Xin, YILMAZ O, et al. An integrated adaptive repair solution for complex aerospace components