

军用航空发动机再制造工程管理的认识与实践

向 巧

(中国人民解放军第5719工厂,四川彭州 611936)

[摘要] 军用特别是歼击机发动机的设计、制造、维修比其他所有航空发动机都更难掌握,被极少数国家垄断,核心技术概不转让,表现为高风险、高投入、高壁垒、高成本。我国军用航空发动机的设计与制造还没有走出自主研发道路,长期靠测绘与进口满足需求。国内某企业经过二十多年不懈努力,已实现我国所有歼击机发动机(包括在研机使用的发动机)的自主维修,技术、能力、质量、效率、成本等达到或超过引进国水平,从无到有、由弱到强;特别是数十项具有自主知识产权的再制造技术研发与工程化应用,为军用航空发动机自主维修水平的跨越式提升发挥了不可替代的作用。

[关键词] 军用航空发动机;再制造;工程;管理

[中图分类号] C931;V263 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)11-0067-07

1 前言

军用航空发动机大修时必须返厂彻底分解,逐一每个零部件进行故障检查,然后根据故障情况确定修理方案。经过长期在恶劣环境中使用后,大量叶片、燃烧室等转动部件、热端部件和燃油系统的关键零部件由于损伤或到寿而报废。由于我国长期没有自主维修核心技术,过去对报废件只能以新品替换,成本高且受制于人,报废件寿命也限制了整机的使用寿命,使价格高昂的航空装备不能充分发挥使用效能,造成极大浪费。维修中还发现,航空发动机还存在一些原始设计制造缺陷,给飞行安全带来隐患。在我国三代歼击机发动机主要依赖进口的情况下^[1],上述问题曾是长期制约我军航空装备保障的瓶颈,严重影响部队战斗力。

要满足用户需求,摆脱受制于人,必须研发自主核心技术,实施军用航空发动机再制造工程,使报废的关键零部件得以再生,使设计制造缺陷得到修正,从而使维修质量效率更高,发动机使用时间

更长,飞行更安全、经济。

2 军用航空发动机再制造工程

某一特定工程是由某一(或某些)专业技术为主体和与之配套的通用、相关技术,按照一定的规则、规律,实现某一(或某些)工程目标的组织、集成活动^[2]。再制造工程是一个以产品全寿命周期设计和管理为指导,以优质、高效、节能、节材、环保为目标,以先进技术和产业化生产为手段,完成修理或改造废旧产品的一系列技术措施或工程活动的总称^[3]。

军用航空发动机再制造工程是指以军用航空发动机全寿命周期设计和管理为指导,以先进技术和产业化生产为手段,针对军用航空发动机附加值高的因受损或到寿而报废的关键零部件的再生技术、原始设计制造缺陷识别及改进技术进行研发,并开展工程化应用的一系列活动。

2.1 军用航空发动机再制造技术

军用航空发动机再制造技术是对报废的关键

[收稿日期] 2013-08-30

[作者简介] 向 巧(1963—),女,重庆彭水县人,工学博士,高级工程师,主要从事航空发动机维修技术及工程管理的研究与应用工作;

E-mail:xiangqiao@vip.163.com

零部件进行再生、对设计制造缺陷进行修正,且质量和性能不能低于新品的先进技术,是一系列“前处理技术+‘增材’制造技术+性能及形变恢复技术+原始缺陷判别及修正技术+寿命预测评价及考核验证技术”的技术集群,涉及不同型号、不同结构、不同材料、不同技术和工艺。

对我国引进的三代歼击机发动机而言,进行再制造的重要意义和作用主要体现在:突破引进国的修理禁区,对报废的叶片、燃烧室等转动部件、热端部件和燃油系统的关键零部件进行再生,降低成本、提高效益,并实现发动机延寿;修正军用航空发动机原设计制造缺陷,提高发动机维修后的可靠性,消除飞行安全隐患。而三代歼击机发动机需要满足作战训练各种复杂严苛的需求,使用环境恶劣,技术难度和可靠性要求达到机械产品的极致,引进国尚未掌握其再制造技术,自主研发具有极强的挑战性和复杂性。概括起来,主要有以下5类关键技术^[4]。

1)前处理技术。对于报废或有缺陷的零部件,其失效部位往往存在腐蚀、氧化等污染层,有的还带有特殊的涂层,必须采用不同的前处理技术对污染层和原始涂层进行彻底有效的清理,否则无法保证后道工序的效果和质量。

2)“增材”制造技术。零部件失效模式常表现为裂纹、断裂、缺损等,必须采用焊接、激光成型等“增材”制造技术恢复其尺寸和形状。应用信息化技术可对再制造零部件的受损部位进行计算机检

测、几何特征定位和快速近净成型,这是目前技术含量最高的“增材”制造(3D打印)技术。

3)性能及形变恢复技术。零部件使用后内部显微组织会发生变化导致性能降低,“增材”制造后也会有表面形变和内部显微组织变化,而且往往外形复杂、精度高、表面状态各异,因此,必须采用合适的性能及形变恢复技术使其组织性能、外形尺寸和表面状态符合要求。

4)原始缺陷判别及修正技术。零部件在设计 and 制造过程中由于各种原因造成的设计制造缺陷往往给飞行安全带来隐患。必须在积累大量发动机故障数据的基础上,吃透原始设计原理,分析故障规律,识别原始缺陷,通过计算机模拟分析手段对缺陷部位进行判别,研究修正技术,消除隐患。

5)寿命预测评价及考核验证技术。再制造前,必须采用先进的检测分析与计算技术评价其可再制造性;再制造加工后,又须采用先进的考核与验证技术预测及评价其使用寿命。

2.2 军用航空发动机再制造技术工程化

军用航空发动机再制造技术是军用航空发动机维修技术发展的高级阶段,其工程化对实现军用航空发动机维修工程优质高效的目标至关重要。如图1所示,再制造技术的输入决定了维修线建设、维修技术方案制订、资源配备、工艺流程、工艺分工与工艺布局,决定了多型跨代维修产品的输出,即工程化目标的实现。

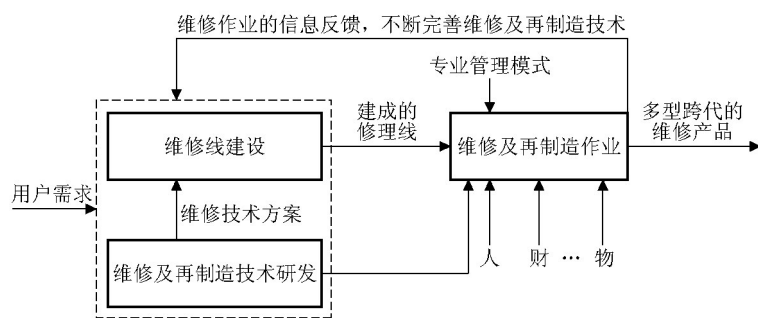


图1 航空发动机维修工程的对象与主要过程^[5]

Fig.1 Objects and main processes of the maintenance engineering for aero-engine^[5]

3 军用航空发动机再制造工程管理

军用航空发动机再制造产品具有小批量、多品种特点,均为关键部件,可靠性要求很高;技术开发

与应用的难度不低于原件制造技术;工程的特点是以逆向作业和逆向物流来实现目标。可见其工程管理难度很大,因此笔者提出的军用航空发动机再制造工程管理是以再制造的核心专业技术为主体,

以产品全寿命周期管理、价值流、系统工程、并行工程、组织行为学等管理理论为指导,融合其他相关技术和管理手段,与军用航空发动机维修全过程、全型号、全寿命期的系统化管理有机集成,简而言之,就是专业化管理与系统化管理的有效结合。经过长期的“实践→理论→实践”反复提炼和总结,不断完善,现已自成一统(见图2)。

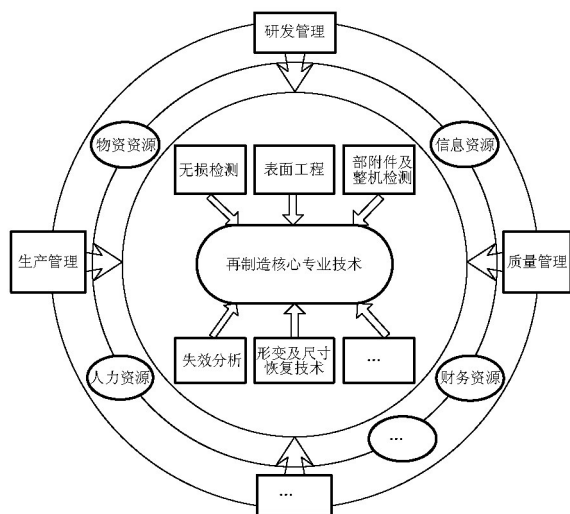


图2 军用航空发动机再制造工程管理

Fig.2 The management of remanufacture engineering for military aero-engine

3.1 专业化管理

军用航空发动机再制造工程专业化管理主要体现在:以再制造核心技术为重点的研发管理,以可靠性为中心的质量管理,以“故障检查(处方)”为枢纽的逆向作业和逆向物流管理。

1)以再制造核心技术为重点的研发管理。如图3所示,按照产品全寿命周期使用的要求,分析、确定各类报废关键零部件再制造的技术可行性与经济可行性,针对性地研发再制造核心技术,进行“试样级+部件级+整机级”的考核验证。用数字仿真系统对拟采用的工艺进行模拟、分析和优化,对再制造后的性能进行预测^[6],可降低研发成本与技术风险,缩短研发周期。

2)以可靠性为中心的质量管理。再制造件品种多、批量小,为确保质量状态可控和可追溯,必须以可靠性为中心,实施细化工步的过程控制和数字质量身份证管理。将修理方法细分并固化到具体工步中,通过定义、归集、替代和对应,建立系统总体控制程序;对再制造件逐一赋予唯一的识别编码,建

立分解、再制造、组装、交付等全过程的数据库。

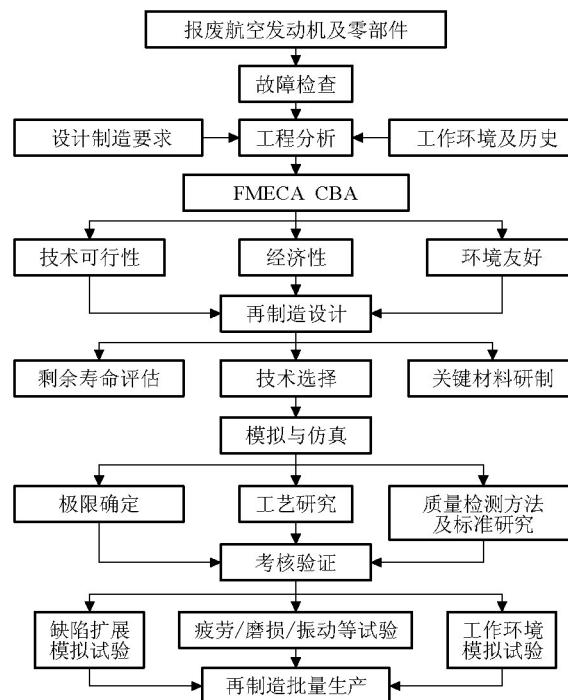


图3 再制造研发管理^[5]

Fig.3 The management on the research and development of remanufacturing^[5]

注:FMECA CBA表示故障模式成本与收益风险分析

3)以“故障检查(处方)”为枢纽的逆向作业和逆向物流管理。再制造生产过程是逆向作业和逆向物流(报废→故障检查→修复)，“故障检查(处方)”是整个再制造生产管理的枢纽(见图4),即通过故障检查,判定再制造件存在的缺陷或故障,针对性地制定个性化工卡,进行再制造作业和工序流转,使原应报废的零部件再生并获得新价值。而传统维修是正向作业和正向物流(分解→故障检查→报废),报废件已经没有价值。

3.2 系统联动管理

通过建立扁平式柔性化、授权与激励相结合的组织管理模式^[7],再制造工程专业化管理与军用航空发动机整机维修工程系统化管理有机集成,实现系统联动。主要体现在以下5个方面。

1)企业资源计划(ERP)。构建ERP信息化平台,以信息流的高效流动促进资源的合理配置,形成覆盖军用航空发动机维修全型号、全寿命、全专业、全系统的“系统集成、人机合一”的网络式工作平台。

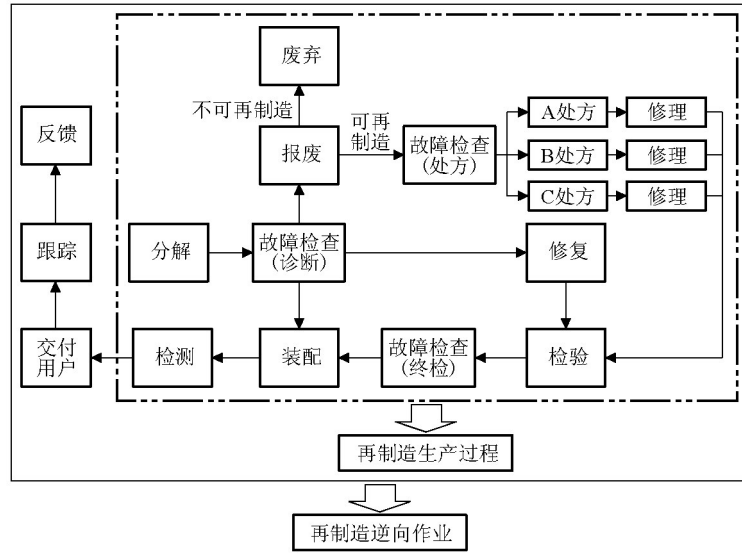


图4 再制造逆向作业和逆向物流管理^[5]

Fig.4 The management on reverse operation and reverse logistics of remanufacturing^[5]

2)维修线建设工程管理。实施并行工程,在维修线建设阶段同步研发再制造技术,提高维修线的成熟度^[8];同步规划、配置再制造所需资源,提高再制造能力和水平。

3)用户服务管理。在预防为主、全天候、零距离的用户服务体系中,融入再制造的理念,关注并及时收集用户需求,提高再制造的针对性和有效性。

4)成本管理。将再制造作业单元作为微型利润中心,与体系中其他作业单元建立内部市场关系,用经济杠杆建立有效的授权和激励机制,从而降低成本。

5)文化管理。使企业文化与员工的行为相融合,以增加全员的活力与责任心。在企业文化体系

中渗入再制造的元素,如“给飞机心脏创造新的生命,为航空发展贡献不竭动力”的企业使命、“绿色维修、美好环境”的企业环保观等,使再制造理念深入人心,人人树立再制造意识。

4 军用航空发动机再制造工程管理取得显著成效

4.1 拥有了自主知识产权的核心技术体系

研发构建了涵盖不同型号、不同失效模式、不同材料、不同零部件的再制造技术体系(见表1),使大量报废的关键零部件得以再生,设计制造缺陷得到修正,多型发动机实现延寿,维修质量效率明显提高。

表1 军用航空发动机关键零部件再制造技术体系^[5]

Table 1 Remanufacturing technology system of critical components for the military aero-engine^[5]

不同失效模式	所用再制造技术	不同材料
变形	恢复热处理	铸造高温合金
外物打伤	自动微弧等离子焊	钛合金
裂纹 (含烧蚀)	粉末冶金	铸造高温合金
	手工微弧等离子焊	变形高温合金
	感应钎焊	变形高温合金
	真空钎焊	变形高温合金
	氩弧焊+超声波振动去除应力	变形高温合金
	微损伤无变形再制造	铸造合金

续表

不同失效模式	所用再制造技术	不同材料
磨损	氩弧堆焊	铸造高温合金
	纳米电刷镀	变形高温合金
	激光焊接	钛合金
	真空电弧钎焊	铸造高温合金
	真空充氩感应堆焊	钛合金
	微损伤无变形再制造	铸造高温合金、铸造铝合金、钛合金
	爆炸喷涂碳化钨涂层	铸造高温合金
	等离子喷涂钴铬钨涂层	铸造高温合金
腐蚀	深度粘结修复	C/C 复合材料
	多次低温渗铝+稀土硅酸盐涂层	马氏体不锈钢
高温腐蚀气蚀	热障涂层	铸造高温合金
	铝硅钇涂层	铸造高温合金
	渗铝硅涂层	铸造高温合金
	渗铝涂层	铸造高温合金、变形高温合金
	整形扰流	铸造铝合金
分层裂纹	楔形挖补热固修复	树脂基复合材料
	仿型贴补热固修复	树脂基复合材料
高温氧化	碳化硅/氧化铝-硼酸盐涂层	C/C 复合材料
	碳化硅/碳化硼梯度涂层	C/C 复合材料
	磷酸盐基涂层	C/C 复合材料

1)修复了大量报废关键零部件,大幅降低整机维修费。先后再生了按引进标准不能修复的数万件关键零部件,用于数百台三代引进军用航空发动机,节约大量零部件采购经费,发动机整机维修价格仅为同行企业的78%。

2)延长了整机使用寿命。将再制造技术成功应用于多型近千台军用航空发动机整机延寿;对某型三代引进军用航空发动机延寿起到关键作用,相当于1台发挥了1.6台的作用;节约了巨额采购经费。

3)确保了产品修复质量,提升了装备可靠性。再制造的关键零部件装机使用后,从未发生因再制造零件导致的质量问题;完成数十项军用航空发动机结构改进和工艺改进,维修后的提前返修率远低于新机;连续十多年没有因维修原因造成等级飞行事故。

4)效率提高,周期缩短。在修各型军用航空发动机修理周期均明显缩短,某型三代引进军用航空发动机修理周期仅为实施再制造工程管理前的40%,比用户规定的标准周期缩短30%以上。

4.2 带动了军用航空发动机维修工程管理模式变革
军用航空发动机再制造工程管理带动了军用

航空发动机维修工程管理模式变革,从刚性的直线职能式管理(见图5),到矩阵式管理(见图6),再到形成以关键零部件修复与再制造专业化管理、多型跨代整机柔性化管理和全寿命、全型号系统集成管理为主体,专业化分工与系统化管理相结合的、扁平化网络状的柔性化集成式军用航空发动机维修工程管理体系(见图7)。实现从笼统维修、换件维修、经验维修、故障维修到分类维修、深度维修、科学维修、预防维修的跨越提升,建成国内唯一具有主机、所有控制装置及工序自主修理能力的三代歼击机引进发动机修理线,变单型号单线修理为近20个型号同时并线修理,处于同类产品维修效率成本国际先进水平。二十多年来,特别是1999年以来,为国内外用户维修了大量的军用航空发动机,创造了显著的军事效益、经济效益和社会效益。

5 结语

维修是航空发动机整个服役周期中的重要环节,再制造是维修发展的高级阶段,已经在军用航空发动机全寿命周期管理的后端发挥了至关重要

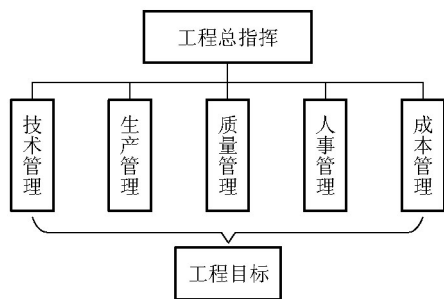


图5 直线职能式的军用航空发动机维修工程管理
Fig.5 Linearly functional management for military aero-engine maintenance engineering

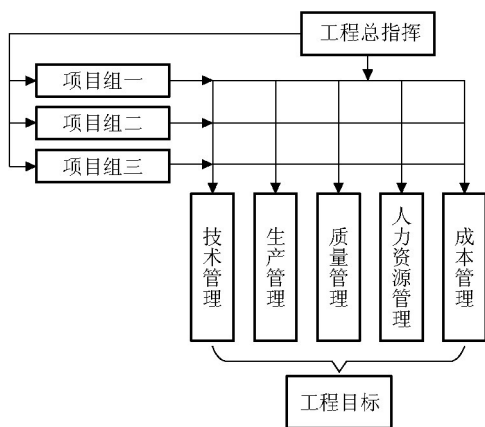


图6 矩阵式的军用航空发动机维修工程管理
Fig.6 Matrix management for military aero-engine maintenance engineering

的作用。美国发动机行业认为,一型航空发动机的整个服役周期是研制工作必须关注的范围,这是因为它服役的各种细致表现都是对前期研发工作的反馈输入,没有这种反馈输入以及相应的后续研发和改进,进而实现初始设计指标的落实和超越,发动机的研制工作就没有完成^[9]。如果将再制造工程管理中积累的故障数据、修复经验与技术反馈应用到设计制造中,必将在军用航空发动机全寿命周期管理的前端发挥重要作用,进而促进我国航空发动机行业的整体进步。在当前我国航空动力总体落后的情况下,若把该技术同步向民航发动机与燃气轮

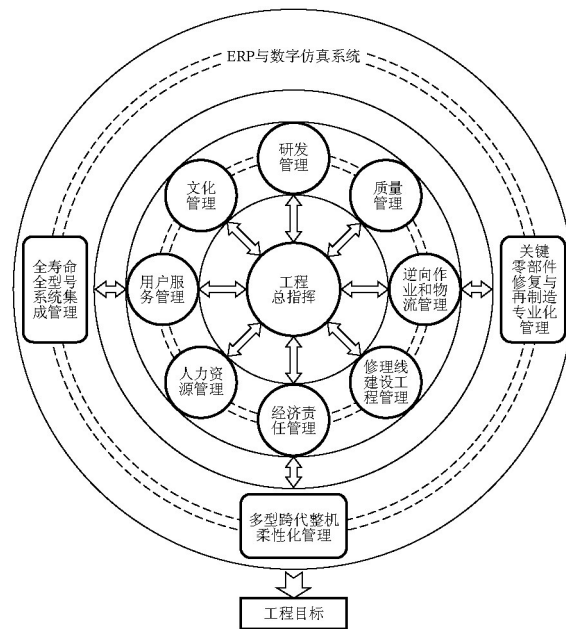


图7 柔性化集成式军用航空发动机维修工程管理
Fig.7 Flexibly integrated management for military aero-engine maintenance engineering

机领域拓展,将具有非常重要的战略和现实意义。

参考文献

- [1] 刘大响,谢 京.根治中国飞机“心脏病”的再思考[J].航空知识,2012(8):24-27.
- [2] 殷瑞钰,汪应洛,李伯聪.工程哲学[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [3] 徐滨士.装备再制造工程的理论与技术[M].北京:国防工业出版社,2007.
- [4] 向 巧.试论再制造工程及其在航空装备修理中的应用[J].空军装备,2004(10):49-50.
- [5] 向 巧.航空发动机维修工程管理[M].北京:机械工业出版社,2013.
- [6] 向 巧,罗瑞盈,章劲草.炭/炭复合材料等温CVI工艺计算机模拟的应用[J].炭素技术,2009,28(1):40-43.
- [7] 向 巧.军用航空装备基地级修理柔性化保障模式的构建[J].航空杂志,2011(7):50-51.
- [8] 向 巧,钟 杰,唐民锋.某型航空发动机修理能力建设项目管理成熟度模型研究[J].项目管理技术,2013,11(4):102-107.
- [9] 宋宜昌,谢 京.发展航空产业的决策与谋略[J].航空知识,2013(6):24-27.

Recognition and practice on remanufacturing engineering management of military aero-engine

Xiang Qiao

(The Chinese People's Liberation Army No. 5719 Factory, Pengzhou, Sichuan 611936, China)

[Abstract] Design, manufacture and maintenance of military fighter engine are particularly a lot more difficult to learn than those of other military aero-engines. Owing to military aero-engine is monopolized by very few countries and its core technology is never transferred, it features high risk, high investment, high barrier and high cost. Currently, design and manufacture of military aero-engine in China have not reached the level of independent research and development, instead, the method of long-term dependence on copying or importing others' military engine is adopted to meet the needs. However, after over twenty years of unremitting efforts of some domestic enterprise, Chinese all fighter engines including engines powered in designing aircraft have completely achieved the level of independent maintenance, whose maintenance technology, ability, quality, efficiency and cost have reached or surpassed those of importing nations, with a change developing from nothing and an improvement from weak to strong. In particular, more than ten projects concerning research and development of remanufacturing technology and the engineering application with the feature of independent intellectual property rights have promoted leapfrog improvement of Chinese military aero-engine independent maintenance level, whose function cannot be substituted.

[Key words] military aero-engine; remanufacturing; engineering; management