



向巧 XIANG Qiao

中国工程院院士

Academician of Chinese Academy of Engineering

“两机”重大专项工程副总设计师

Deputy Chief Designer of National Major Project of Aeroengine and Gas Turbine


航空发动机领域专家,军队科技领军人才,中国科协常委、学术交流专门委员会委员、女科技工作者专门委员会委员,联合国教科文组织奥尔堡中心咨询委员会委员,中共十八大代表,全国劳动模范。现任中国航空发动机集团公司总经理助理,科技委副主任,“两机”重大专项工程副总设计师。长期从事航空发动机工程管理和技术研究并作出突出贡献。以第一完成人获国家科技进步二等奖1项、军队及省部级科技进步一等奖等共8项;发表论文90余篇,出版编著4部,译著1部;授权发明专利20项,实用新型专利12项。

自主创新, 开拓航空发动机零件再制造之路

——访中国工程院院士, 航空发动机领域专家向巧

Independent Innovation Opening up the Road of Aeroengine Part Remanufacturing

本刊记者 文竹

: 请您简要介绍一下我国再制造技术的发展脉络和动态,以及再制造技术在高端工业领域的应用价值。

向巧: 再制造(Remanufacture)

是指以废旧产品作为生产毛坯,通过专业化修复或升级改造的方法来使其质量特性不低于原有新品的制造过程。简言之,再制造就是修旧如新、乃至修旧超新的制造过程。


国内首次提出“再制造”概念是在1999年6月徐滨士院士于西安召开的“先进制造技术国际会议”上发表的学术论文《表面工程与再制造技术》当中。2000年12月,徐滨士院

士在中国工程院咨询报告《绿色再制造工程在我国应用的前景》中,对再制造工程的技术内涵、设计基础、关键技术等进行了系统、全面的论述。2006年12月,在中国工程院咨询报告《建设节约型社会战略研究》中,机电产品的回收与再制造被列为建设节约型社会17项重点工程之一。10余年来,我国政府高度重视再制造,从法律法规、政策制度、发展规划等多方面,全力推动再制造的发展。2005年,国务院连续发布两个文件,首次提出支持废旧机电产品再制造,到2015年,国家层面上已制定了近50项再制造方面的法律法规,20余项再制造专项政策法规。应该说,我国已呈现出以国家目标推动再制造产业发展的态势。我国的再制造技术一开始是在表面工程技术的基础上提出并发展的。20世纪80年代初,英国伯明翰大学教授T.Bell建立了世界上第一个表面工程研究所,1985年创办了国际《表面工程》杂志,同时将国际热处理联合会改名为国际热处理与表面工程联合会。徐滨士院士1987年提出建立了我国第一个表面工程研究所,1988年创办了我国第一本《表面工程》杂志,1997年更名为《中国表面工程》,国内外正式发行,1997年中国机械工程学会正式成立了表面工程分会。为满足我军装备维修的需要,1991年成立了全军表面工程推广中心,当时的军委副主席刘华清上将亲自为中心题词:“表面工程出效益出战斗力”,1992年,在空军建立了表面工程推广站,挂靠在某5719工厂,我有幸成为第一任常务副站长,也就在那时,与徐滨士院士结缘,在徐院士的学术思想影响和再制造理论指导下,从表面工程到再制造,一路走来,带领团队致力于航空发动机的维修及再制造技术研究与应用,2010年,主持完成的科研项目“军用航空发动机零部件再制造技术及应用”获得了国家

科技进步二等奖。

再制造回收了产品原制造过程的附加值,而成本一般不超过新品的50%。由此可知,附加值越高的工业产品,再制造技术的应用价值越大。据日本通产省统计,产品单位重量创造的价值如下:轮船1:1;汽车1:9;计算机1:300;飞机1:800;航空发动机1:1400。做个形象的比喻,汽车单位重量的价值只相当于一个汉堡包,而航空发动机单位重量的价值等同于单位重量的白银,航空发动机涡轮叶片单位重量的价值则等同于单位重量的黄金。

美国2011年的统计表明,人均再制造产值分别为:航空业37万美元,医疗器械35万美元,汽车零件20万美元,普通消费者产品只有8万多美元。为此,从再制造过程本身创造的价值来看,工业领域的高端性与再制造的附加值也是正相关的。可见,航空发动机再制造的附加值高于其他工业产品,其中,涡轮叶片再制造的附加值最高。

:众所周知,你率先把再制造技术应用到我国的航空发动机维修方面,请简要回顾一下你的科研工作历程,或分享一下印象深刻的事情。

向巧:关于航空发动机零部件再制造,我看到的最早的资料是美国Chromalloy公司在1986年的一份公司介绍,从中可知美国至少从20世纪60年代初,即开始了航空发动机和燃气轮机零部件的再制造研发和生产,而且创造了非常好的经济效益。

在表面工程技术的基础上发展的再制造技术,我姑且称之为表面工程再制造技术。通过多年的研发与应用,表面工程再制造技术已逐步形成了以寿命评估技术、复合表面工程技术、纳米表面技术和自动化表面技术为核心的再制造关键技术群。徐滨士院士提出的纳米电刷镀技术就

是其典型代表。我带领团队通过纳米电刷镀技术的创新应用,修复了因榫头磨损而报废的引进航空发动机压气机静子叶片。

应该说,表面工程再制造技术的研发与应用在航空发动机维修中发挥了重要作用,修复了大量因表面磨损而报废的零部件。但是,由于航空发动机在高温、高压、高转速、高空环境下长时间使用,零部件种类多、材料杂、结构各异、服役状态不同,导致损伤模式多,有表面磨损的,也有表面烧蚀的,还有裂纹、断裂、组织退化等,要使这些因各种损伤而报废的零部件都通过再制造得到再生,显然,仅有表面工程再制造技术远远不够,就算是表面工程再制造技术,也得针对航空发动机零部件特殊的材料与结构特性,分析其失效表面的特征,研究不同于汽车等地面产品的再制造技术。

我带领团队对军用航空发动机关键零部件开展再制造,是被逼出来的,是在问题的倒逼下走出的一条自主创新之路。我曾经在5719工厂工作30余年,那是一家从事航空发动机大修的MRO企业,我在工厂几乎所有技术和技术管理岗位都工作过,我军歼击机发动机的所有型号几乎都修过。航空发动机使用到翻修期或有重大故障,就得彻底分解大修。因为军机使用环境极为恶劣,翻修期一般只有数百小时,叶片等关键件报废量也极大。

对航空发动机这种多系统构成、可靠性要求极高的复杂装备,为确保维修质量,国际上通常采用“换件”和“外委”的维修模式,即对报废件以新品替换,或委托专业化厂修理。对引进航空发动机而言,对外送修不仅价格昂贵,周期漫长,而且可能涉及多个国家,还会受国际政治影响,送修或引进备件都严重受制于人。以叶片为例,叶片是目前航空发动机数量最多的关键件,工作环境最恶


劣,价格也最为昂贵。某型发动机全台叶片数达到 2000 多片,如果全台更换,价格接近发动机整机采购价的 2/3。而且,航空发动机还可能带有各种原因造成的设计制造缺陷,给飞行安全带来隐患。因此,航空发动机的维修保障问题曾长期影响用户装备完好率。

20 世纪 90 年代,我有机会多次到欧美俄培训或考察,在欧美先进的维修技术和徐滨士院士表面工程理论的启发下,我主持攻克了一些国产二代机的技术难题,其中叶片涂层技术在 20 世纪 90 年代就获得 2 项军队科技进步二等奖、3 项发明专利。

在学习考察中,我发现欧美等发达国家高度重视高端动力装备关键部件的再制造技术研发,形成了叶片等关键件的再制造能力,但对其核心技术严密封锁,概不转让,对中国尤其如此。如民航发动机的维修,他们宁愿在新加坡、马来西亚等国设相应的维修厂,也不允许在中国开展叶片等关键件的修理。我感到,为摆脱受制于人,满足用户需求,必须立足自我,自主创新,研发自己的再制造技术以及相应的维修标准和维修体系,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,装备运行时间更长,使用更安全、更经济。

通过近 20 年的努力,我带领团队建立了军用航空发动机关键零部件再制造核心技术体系,主持构建了基于问题的我军特色航空发动机维修工程管理体系。军用航空发动机关键件(以下简称关键件)再制造技术是对报废的关键零部件进行再生,对设计制造缺陷进行修正,且质量特性不低于新品的先进技术。主要有:前处理技术、表面完整性修复技术、性能及形变恢复技术、寿命预测评估及考核验证技术。应用以上再制造技术体系,我主持对大量按原规定必须报废的叶片等关键件进行了再制

造,包括引进和国产三代机,有 4 万多件关键件装在千多台次航空发动机上安全飞行 33 万多小时,从未出过问题。这个数据还是我在 5719 厂时的统计,现在就更多了。

:你从事近 20 年的再制造技术的研究、推广及管理工作,开创了工程管理理论和方法的新领域,请简要介绍航空维修工程管理理论要点。

向 巧:在多年实践基础上,我提出了基于问题的工程管理的理念,主持构建了基于问题的航空发动机维修工程管理体系。基于问题的工程管理,是对某一特定工程,以挖掘、分析和界定工程的关键问题为基础,以系统解决问题为目标,以全员、全过程、全要素关注问题及解决问题为路径和方法的一系列管理活动。基于问题的航空发动机维修工程管理体系,是针对航空发动机维修保障面临的主要问题,以工程学、管理学、经济学和系统论为理论基础,以航空发动机维修线建设工程管理成熟度模型 AO2PM3 为指导,以形成综合维修保障能力为目标,所开展的一系列工程管理活动的系统化安排。

航空发动机维修线建设工程管理成熟度模型 AO2PM3,是我在美国项目管理协会提出的项目管理成熟度模型 OPM3 的基础上,基于系统工程、并行工程和价值流理论,研究分析欧美俄维修模式及国情军情,在 2004 年提出来的。这个模型包括项目能力(含组织结构/过程方法/资源提供/企业文化)、建线过程(含基础设施/设备工装/工艺技术/质量保证/整机试修/附件试修/经费管理/备件保障)、建线成果(即维修能力)模块;设定各模块评价指标及方法,导入设计或实测数值,即可得出维修线的成熟度,由低到高为 I 至 V 级,成熟度越高,维修水平和能力就越高。该模型既能够对单一型号,也能对多型号集成的航空发动机维

修线建设工程管理进行指导和评价;既可用于指导维修线建设,也可用于评价已建成的维修线,确定改进机会,通过再造提升成熟度;从而解决了航空发动机维修线建设的技术评定和标准问题,实现了建线有指导、评价有标准。

用这个模型评估 2004 年的维修线,只有 II 级成熟度。于是,我主持按 V 级的标准提出了成熟度提升的体系架构,以问题牵引、创新驱动为指导思想,以形成综合维修保障能力为目标,以成熟度模型为评价标准,以一体化管理、差异化施修的企业标准体系,专业化分工的维修技术体系、系统化管理的逆向作业体系、聚焦可靠性的质量管理体系、关注问题鼓励创新的企业文化管理体系、智能化的维修作业信息系统为路径和方法,主持对管理动了大手术,先后开展了 3 次流程再造,主持创建了产品、业务、职能三维魔方方式组织结构,打破职能壁垒,按产品或业务所需像玩魔方一样快速整合资源成立项目团队,形成了产品牵引、业务支撑、职能保障的工程运行机制,实现企业资源柔性化共享、项目化利用。

2012 年,全面建成航空发动机维修工程管理体系,在同一维修保障基地实现引进与国产、二代与三代多型军用航空发动机并线自主维修,成熟度达 V 级,各型号维修能力均超过设计指标,最高达 2.4 倍。国产与引进航空发动机单元体与部附件自修率均达 100%,关键件再制造率分别为 65%、70%,易损件与必换件自制率分别为 35%、65%。2013 年建成我国首个航空发动机再制造技术应用研发中心,国内首次实现 3D 打印在航空发动机叶片再制造上的工程化应用。维修的航空发动机连续 20 年累计飞行 170 余万小时无责任维修事故,维修周期平均仅为用户规定周期的 1/3,维修价格平均仅为新品的 1/4。

(责编 铃兰)