

航空发动机延寿技术进展

Progress of Aero Engine Life Extension Technology

■ 张岩 刘宁 朱剑宏 / 中国航发动力股份有限公司

包括延寿技术在内的航空发动机寿命管理是现代航空领域中的关键技术之一，旨在提高航空发动机的安全性、可靠性与维修性，确保飞机的飞行安全和航空业的可持续发展。

航空发动机寿命管理工作涉及整机、单元体、零部件，目的是确保发动机安全、可靠的工作，包括定寿和延寿工作。航空发动机延寿技术以零部件定寿工作为基础，通过多维度综合分析发动机或零部件的使用状态，确定能否延长使用寿命。航空发动机延寿技术能够在新型发动机研发周期长的情况下，弥补代际战斗力转换空隙，并且使发动机有更长的在翼时间，减少维修次数，提高飞机的作战效能^[1-3]。

先进制造商主要延寿策略

国际上先进的制造商对航空发动机寿命管理的认知普遍经历了失败—总结经验—改进的过程，并出台了指导性文件规范研制阶段的寿命管理，从结构完整性角度确定了延寿要求。随着计算技术与传感器技术的发展，针对服役中的航空发动机，先进制造商一般通过健康管理实时监测关键件的使用状态，通过抽检计算关键件的剩余寿命，实现发动机的延寿。

以顶层文件规范寿命管理

美国在航空发动机研制过程中曾盲目追求性能，导致F100发动机可靠性和耐久性不满足实际要求。为保证研制的航空发动机具有良好的结构完整性，美国在总结前期设

计、使用和管理经验的基础上，于1984年11月颁布了第1版《发动机结构完整性大纲》，并先后进行了2次升级。英国于1987年1月颁布《飞机燃气涡轮发动机通用规范》，并先后进行了8次升级。两份文件均通过加强顶层规范，从航空发动机预研、设计、生产和使用的全生命周期理念出发，对发动机寿命管理提出规范要求，延长使用期限，有效降低全生命周期成本，确保发动机结构安全^[4]。

以健康管理提高寿命利用

当前，国际先进航空发动机产品已从定时大修模式发展为基于状态的维修模式，通常采用健康管理系统加强对寿命的科学管理，主要包括：发动机关键件（失效将造成危险性影响）的使用寿命监控、寿命消耗计算、剩余寿命预测、延寿控制等，模型和基于模型的算法是贯穿其中的重要分析手段^[5-7]。F117-PW-100发动机采用概率寿命模型，利用传感器测量数据和预测模型参数，精准计算关键件剩余寿命。F119发动机则采用基于使用情况的寿命监测计划，结合实际飞行情况，收集分析关键件实时数据，并结合假设任务，充分计算研判发动机关键件的实际全生命周期，实现寿命的充分利用。罗罗公司正在研究数字孪生技术，通过将数据与

机器学习和软件分析相结合来创建发动机数字模型，在虚拟世界中镜像实体发动机，根据传感器反馈的监控数据，结合历史数据，确定发动机的运行状况，预测何时需要维护，实现发动机寿命延长。

以延长翻修间隔挖掘潜在寿命

目前，美国航空发动机制造商普遍采用单元体或大部件的发动机寿命管理机制，只规定关键件及单元体或大部件的寿命，没有发动机总寿命的概念，发动机实际使用寿命可达几千小时。因此，美国军用发动机广泛采用抽检延寿法延长翻修间隔，进而实现发动机寿命的延长^[8]。即通过对发动机、单元体和附件进行评估检查和测试，并采用XactLIFE™等工具（见图1），基于工作条件和飞行任务，估算关键件的剩余寿命，进而在确认发动机关键件具有足够剩余寿命的条件下，根据发动机的使用情况和跟踪记录逐步延长翻修间隔。

先进制造商主要延寿技术

合理定寿不仅是延长航空发动机寿命的基础，同时也是一种延寿的重要技术，先进制造商采用损伤容限技术，充分挖掘发动机关键件的潜在寿命，进而实现发动机寿命的延长。此外，充分采用先进技术也是

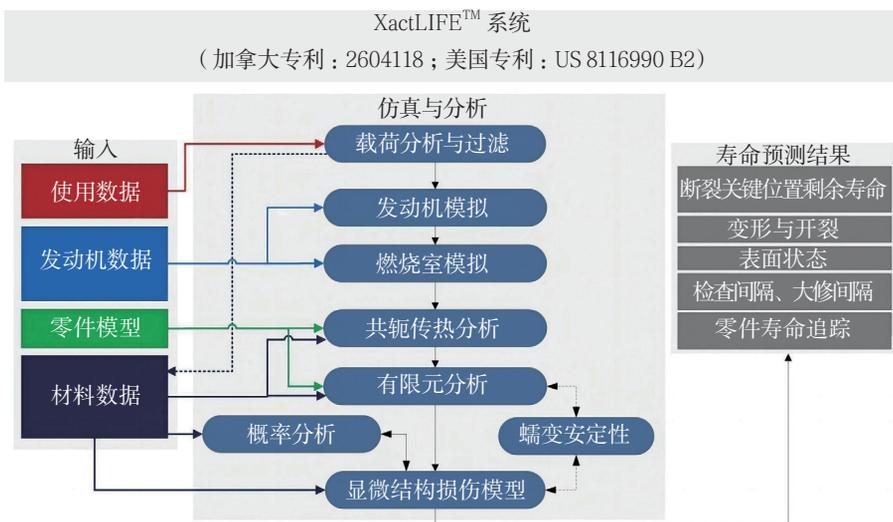


图1 XactLIFE™ 工具图解

航空发动机延寿的重要手段，最常用的方法就是结构改进，即新增或更换旧结构，以及先进材料的使用。

通过损伤容限技术延长关键件寿命

延寿的基础是定寿，定寿不合理将严重影响发动机的可用性和经济性。国外航空发动机制造商从20世纪50年代开始采用安全寿命定寿法，即通过长期试车的数据、计算模型和领先使用确定发动机寿命。20世纪80年代以后，美国军方在对航空发动机压气机和涡轮盘寿命分析的基础上，认为到寿报废未能充分发挥零件的潜在寿命，因此产生了损伤容限的概念，即认为关键件可以有裂纹或有缺陷，并用先进的应力分析法和断裂力学方法分析研究确定发动机主要零部件的寿命。这种方法的关键要素是断裂力学分析能力和无损检测技术能力。相比于安全寿命定寿法，损伤容限定寿法实现了对发动机关键件潜在寿命的充分挖掘。无损检测是实现损伤容限分析的关键技术，其灵敏度和准确度是关键件损伤容限定寿的重要保证。目前损伤

容限定寿法已用于美国空军所有航空发动机关键件的定寿和英国军用高强度粉末冶金零件的定寿和延寿。

通过结构改进技术延长发动机寿命

采用先进技术替代原有的落后技术是美国军方常用的发动机延寿方法。F100发动机是首次采用单元体结构设计的战斗机发动机，先后经过多次改进升级，其中改进型F100-PW-220发动机分3个阶段进行了结构升级，升级后增加1个增压级，延长压气机的总寿命，并采用了延长寿命的核心机和延长寿命

的低压涡轮。F110发动机则实施了升级核心机延寿计划，先后采用基于CFM56-7发动机气动设计的新型压气机、基于CFM56和GE90发动机技术重新设计的新型燃烧室、新加力冷却系统等，实现发动机在翼使用时间增加至3倍，如图2所示。在2023年尘埃落定的F135发动机升级中，美国军方选择了普惠公司的发动机核心机升级（ECU）方案，提升发动机性能，延长发动机寿命。

通过采用先进材料延长发动机寿命

防护涂层对发动机的寿命起着很重要的作用，GE航空航天、普惠和罗罗等公司都曾使用先进防护涂层延长叶片的使用寿命。此外，材料寿命也是发动机寿命的基础，普惠公司在对PW2000的第二次升级中，通过采用单晶材料实现了涡轮工作叶片的寿命延长。

我国航空发动机延寿技术现状

我国航空发动机的发展走过了引进、仿制和自主研发的历程，目前采用翻修寿命和总寿命等指标控制发动机的使用，航空发动机定寿、延寿

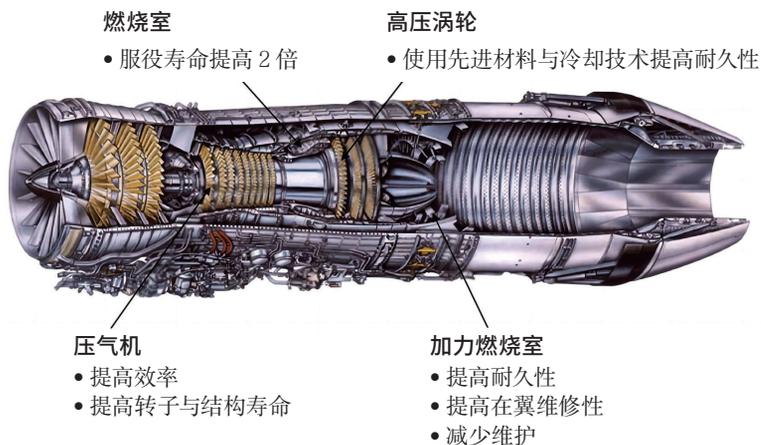


图2 F110的核心机延寿计划

采用的主要方法是关键零部件寿命研究、整机台架试车和领先使用等。

基于安全寿命法的定寿延寿

我国早期采用翻修寿命和总寿命等控制发动机的使用。由于给定寿命短、寿命潜力大等客观原因，后期采用了“整机长试+外场领先使用”的方法，并进一步结合发动机实际使用数据，通过现场可靠性指标的综合评定等技术途径，延长发动机的寿命。随着技术的发展，我国航空发动机延寿除了采用“整机台架试车+外场领先使用”方法外，还通过主要零部件改进、修理工艺及加工工艺改进、试验及整机模拟长试等方法，延长发动机整机寿命。

融合损伤容限法的定寿延寿

随着我国研制能力的不断进步，航空发动机的寿命控制手段也发生变化，开始采用“整机寿命+大部件翻修寿命+旋转关键件安全循环寿命”的寿命控制方法。整机寿命采取“领先使用、分阶段综合评估”的方法评定，即在零部件试验的基础上，通过先锋批发动机分阶段领先使用、检查评估、逐步放行，给出发动机的使用寿命，并进一步通过逐步放行延长发动机使用寿命。

分析和启示

通过对国际先进制造商和我国航空发动机定寿策略和技术的分析与比较，本文得到如下几点启示。

完善文件体系，指导发动机的寿命管理

我国《航空发动机结构完整性指南》的现行版本为1997年颁布的，虽然我国航空发动机的结构设计、分析、定型和生产技术都有了长足的进步，但顶层指导文件并未随之

更新，应当充分总结当前发动机设计、使用和管理经验，进一步完善顶层文件，使其更具现实指导意义。

坚持数据为本，确定和延长发动机寿命

航空发动机延寿的基础是真实、可靠的数据。在研发阶段，应充分开展强度、振动、疲劳和损伤容限设计，准确分析确定零部件寿命；在制造阶段，应通过发动机循环试验、零件疲劳试验和台架试车数据等，验证零部件的使用寿命；在使用阶段，应及时反馈外场故障信息，做好外场排故，开展零部件故障研究，形成体系化的故障与分析数据库，通过对“研发—制造—使用”的全生命周期数据管理，为发动机延寿提供科学有效数据支撑。

开展技术研究，延长关键件的寿命

一是加强基础试验能力建设，准确分析关键件的寿命情况；二是开展激光冲击强化等表面强化技术研究，提高寿命控制件的蠕变性，提升疲劳性能；三是开展先进防护涂层及喷涂技术研究，提高零件的抗氧化、抗腐蚀和耐磨损性能；四是深入开展复合材料与制造技术研究，延长零件本身的使用寿命。

发展健康管理，实现发动机寿命最大化

国际先进军民航空发动机产品均已采用健康管理系统，并已集成到飞机预测性维修系统中。我国应加大对健康管理系统的研究力度，推动传感器技术发展，明确记录参数，提高数据采集与传输能力，进一步研究采用先进算法，持续优化计算模型，不断提高故障预测能力，实现预测性维修，发挥发动机的最大寿命潜力。

结束语

航空发动机的延寿与定寿是密不可分的，国内外在延长发动机的寿命方面开展了大量工作，从最初的限定寿命到当前的健康监测，一直在不断采用新技术延长发动机的使用寿命，使发动机的效能最大化。随着智能化和大数据等新技术的不断发展和取得应用，航空发动机延寿技术未来必将发挥出更加重大的作用。

航空动力

(张岩，中国航发动力股份有限公司，工程师，主要从事航空发动机科技情报研究工作)

参考文献

- [1] 柴水萍. 战机延寿面面观 [N]. 解放军报, 2021-12-3(9).
- [2] 常智勇. 浅谈航空发动机定寿和延寿方法 [J]. 价值工程, 2014(36):79-80.
- [3] 陈国栋, 邢雷, 赵明, 等. 国外航空发动机关键件定寿和延寿方法分析 [J]. 航空发动机, 2013, 39(5):60-65.
- [4] 吴明强, 罗凯, 房红征. 基于寿命预测技术的复杂系统延寿体系设计与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(12):3.
- [5] 陈小磊, 郭迎清, 张书刚. 航空发动机寿命延长控制综述 [J]. 航空发动机, 2013, 39(1):17-22.
- [6] 张百勇, 刘凯. 国内外武器装备延寿技术概论 [J]. 舰船电子工程, 2017, 37(4):10-12.
- [7] 臧伟锋, 董登科, 李宏, 等. 飞机结构延寿的潜力与途径 [J]. 工程与试验, 2023, 63(2):4-6.
- [8] MISHRA R K. TBO life extension of a military turbojet engine by sampling [J]. International Journal of Applied Engineering and Technology, 2013, 3(4):23-32.