

航空发动机研发阶段的整机试验与装配修理概述

Overview of Whole Engine Test and Assembly Repair in the Development Stage of Aero Engine

张美龙 臧元利 白健 赵兴军 / 中国航发动力股份有限公司

航空发动机修理维护工作通常在发动机批量生产或定型后开展，其在发动机研发、制造、维护这一全生命周期的价值量中占45%以上。然而，修理维护的流程与技术手段绝大多数在定型前的研发阶段就已基本确定。因此，分析与发掘研发阶段的整机试验和装配修理流程及特点，是提前锁定此部分价值的关键。

航空发动机结构复杂且多样，对其进行维护修理是一项具有挑战性的工作。目前，我国新研制的发动机仍处于不断探索改进的阶段，从单一零组件到分部件、系统及整机的设计、制造、试验、检修、再试验过程，充满了流程与技术的不确定性。修理的主要目的是恢复或保持航空发动机性能。在发动机研发阶段就充分策划并细致实施好装配、检查、修理工作，并借助整机试验进行验证，可以对定型后的使用维护积累宝贵的经验。

研发阶段的整机试验

航空发动机全生命周期要经历研发、制造、维护3个阶段，而研发期间涉及设计、制造、试验3项费用，3项占比分别为10%、40%、50%^[1]，这充分说明发动机试验的重要性和复杂性。

航空发动机试验项目一般分为部件试验和整机试验^[2]。部件试验包括进气道试验、压气机试验、燃烧室试验、加力燃烧室试验、附件试验、

零组件强度和振动试验等。整机试验包括持久试车、高空试验、发动机环境试验、吞咽试验、发动机外部特征试验、燃油试验和结构试验等，而其中的某一项试验又可能包含多项试验，如吞咽试验包括环境结冰试验、抗腐蚀性试验、吞鸟试验、外物损伤试验、吞冰试验、吞砂试验、吞入大气中液态水试验、吞入火药气体试验等。表1列出了两型发动机在某一阶段的整机试验项目，一般情况下，即便已经尽可能地将1台发动机通过分解检查、修理复装操作来开展更多的试验项目，但要完整地进行一型发动机全部的试验项目，仍然需要数十台甚至上百台发动机

来进行验证。

发动机整机试验需要在试车台上进行，一般包括地面试车台和高空试车台，每一项试验均包含明确的试验目的、试验程序、考核指标，这些内容通常来源于研制立项批复、研制总要求、试验总方案，以及相关标准、规范要求，目的是评定发动机性能和使用要求的符合性，同时这部分内容也是后续发动机定型最重要的依据。

整机试验前装配 发动机技术状态

试验大纲中会规定试验目的、性质、时间、地点、被试品和陪试品、

表1 两型发动机某一阶段整机试验项目

序号	A型试验项目	B型试验项目
1	高空台试验	进气畸变试验
2	超温试验	持久试车(300h)
3	加速任务试车(目标等效350h)	轴向力测试、超温试验
4	70h持久试车考核	高空台持久试车
5	350h持久试车摸底	持久试车(70/150/300h)
6	试飞	预鉴定持久试车
...

试验项目和方法、测量要求等内容。技术状态指在技术文件中规定的及在产品中达到的功能特性和物理特性^[3]，包含的内容十分丰富，在整机试验前发动机技术状态主要指被试品和陪试品的状态。被试品包括名称、型号或零组件号、研制单位、数量、主要的功能作用或被改进产品的改进点，被试品在一些整机试验时可以是单一零件（如贯彻叶型优化措施的叶片），也可以是一套系统（如防喘振控制系统），还可以是整台新研的发动机。陪试品为整机试验所需的除被试品外的其他成附件、系统、测试装备。

发动机装配流程

发动机装配是指将各个零组件、部件，按照设计要求和工艺规范，通过一系列的操作和流程，精准、有序地组装在一起的过程。装配一般流程为小组件装配—部件装配—整机装配，图1给出了涡喷发动机总装配的一个典型流程。

在发动机装配前，需仔细核查

相关零件的数量及状态，并保证所有零件干净且无损伤。装配过程中，需要确保每个零件的安装位置、方向、连接方式等都符合严格的技术标准和质量要求，以保证整机试验及最终使用的性能、可靠性及安全性，过程中有诸如尺寸与配合间隙检测、紧固件拧紧力矩的确认、结合面密封剂涂覆、转子转动灵活性检查等内容。同时，针对特殊的整机测试，装配时应确保测试所需测试线与传感器头按技术规范得到准确的布置与固定，引线均留有足够的外部连接长度或特殊接口。

试验过程中的分解、修理与恢复装配

分解检查项目

依据整机试验的测试需求和目的，制定分解检查的深度和内容。一方面，为了结果的深入、准确及可靠，要求尽可能地将部件、组件分解至零件状态，并且对典型的特征尺寸采用更多的测量截面和更小

的测量步长，必要时采用第二种方法测量或第三方测量机构的检测验证；另一方面，鉴于型号严格紧凑的研发进度、试验节点和成本安排，需要简化一些检查内容。事实上，分解检查项目与分解深度的确定是考验设计、制造、试验等一系列工程技术人员能力的一项工作，这些内容也与航空发动机整体研发进程一样，需要数年甚至数十年的积累才能够相对地确定出一型发动机的分解检查要求。图2中按检查的方法整理出外观检查、尺寸测量、特种检验等分解检查项目及相关明细（不完全），也可按检查实施的时机（整机级、部件级、组件级、零件级）将相关内容分类。

修理技术方案

发动机修理是采用特定的技术手段，恢复零部件、系统原有的设计功能。修理通常包括尺寸、形状、完整性等结构方面内容，以及流量、气密性等性能方面的修复内容。

结构完整性最典型的一类问题是裂纹甚至断裂，利用荧光检查、X光检查发现的微小裂纹通常采用机械打磨去除，之后抛光圆滑，这种方法是通过去除材料实现的，零件尺寸、结构会向设计要求的最小实体偏离。针对具体零件，也会有不同的修复方法。风扇叶片通常采用局部打磨损失部分叶型或焊接修复、数控加工与手工打磨结合，并配合无损检测检查加工表面修复情况；3D打印压气机叶片的修复方式也在逐步应用，GE航空航天公司开发了一种自动化3D打印工艺用于高压压气机叶片尖端修复，在人工和机械加工方面节省了时间和成本；燃烧室壳体、喷嘴焊缝上的裂纹通常在小

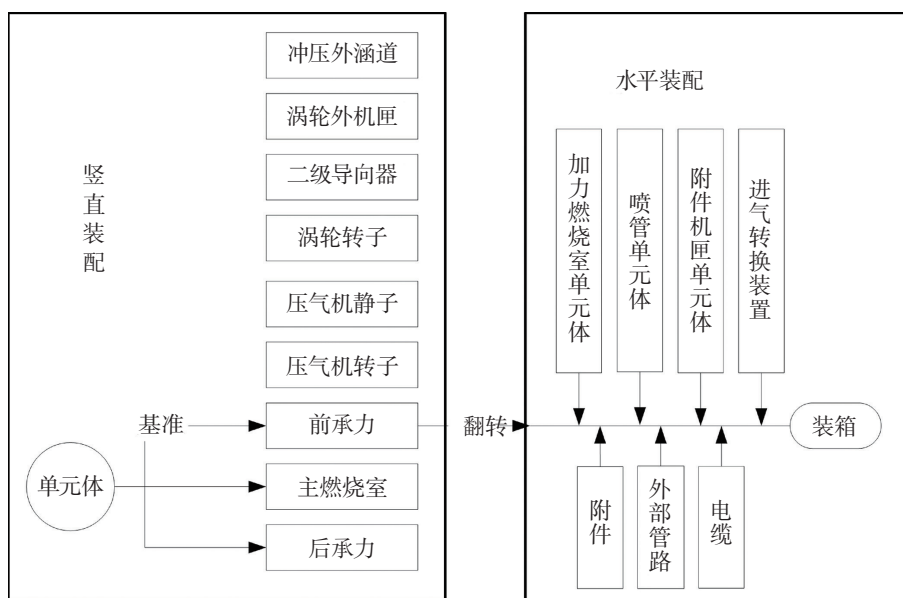


图1 发动机总装配流程

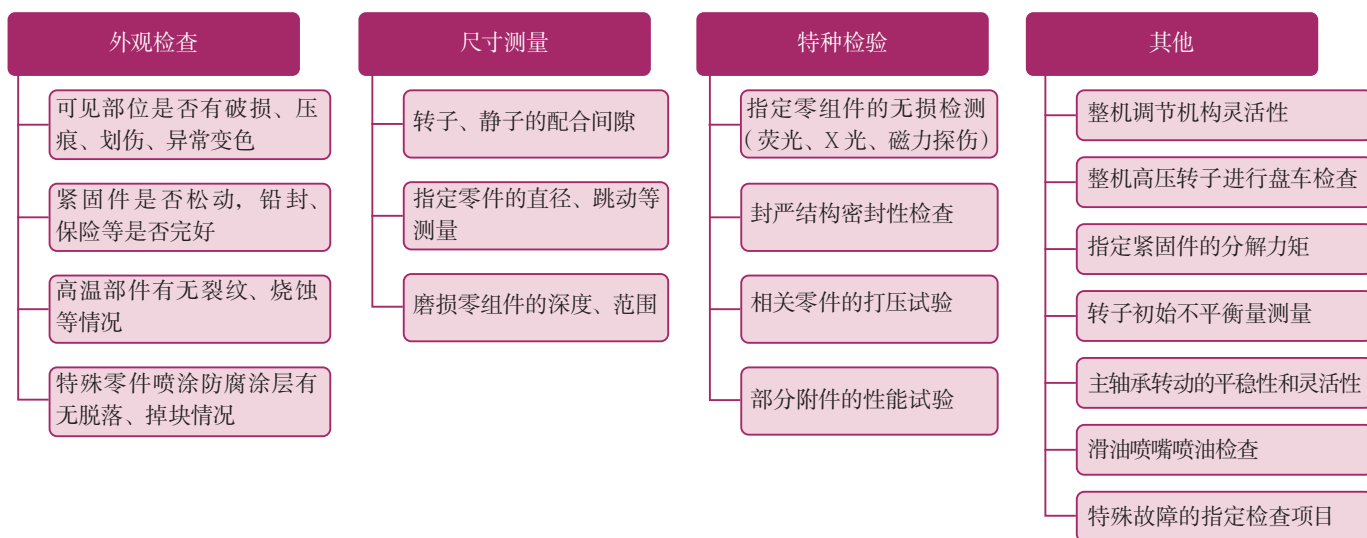


图2 分解检查的一般项目

范围时可以补焊，辅助以密封检查或无损检测确认修复效果；涡轮支承支板的裂纹采用打磨并补焊的方式进行修复。部分严重的裂纹情况可能无法修复，一般采用换件处理。

另一类普遍的修理技术为涂镀层修复，涂镀层广泛应用于发动机相关零组件。涂层包括用于压气机机匣上转子叶尖封严的易磨涂层、轴类零件上耐磨涂层、涡轮叶片等热端零件的热障涂层、为适应海洋湿热环境的防腐涂层等，常见问题为局部的磨损、掉块，偶有整体脱落、失效的情况；镀层包括齿轮类零件的镀镍、用于海洋性环境下钢铁类零件镀镉等，常见问题为镀层磨损露出基体。涂层修复的一般工艺流程是采用机械加工或者化学方法部分、全部地去除原局部磨损、掉块，甚至整体脱落的涂层，之后将零件基体进行清理清洁，而后重新喷涂涂层，采用数控自动化喷涂工艺保证喷涂厚度或者喷涂后采用机械加工来保证需要的尺寸。镀层修复通常用化学溶液去除原有镀层

之后再重新修复，必要时通过调整槽液浓度、改变电镀时间来保证镀层质量。

尺寸修理也是一大类问题，其基本原理可分为直接去除材料、增加材料后去除材料、扩大去除材料并特配零件3类。各安装边止口变形、尺寸跳动超差在原尺寸范围内有可去除材料时可采用车修或者磨削表面修复，不能满足时可采用相应的耐磨或硬质合金镀层，甚至在安装边或止口上堆焊原基体材料，之后再行机械加工。当上述修复方案无法执行时，可以采用特配零件，如增加垫片、调整环来实施修理。

性能修复也是不可忽略的又一类修理问题。喷嘴滑油射流的流量和方向修复通常采用扩孔或堵孔并重新打孔来修复。密封性能的恢复可采用结合面研磨或者修理密封件尺寸来保证，必要时需要更换与之配合的零件，二者形成新的一组对使用的零件。滑油附件、回油泵、离心通风器等附件性能，需要专门的承制厂在指定的试验器中进行性

能验证和修复。

发动机修理旨在满足试验或使用条件下缩短周期、降低成本、延长零组件寿命，定型后的修理经验很大程度上源于研发阶段，随着新技术的不断发展，在新型号研发阶段就需要大胆尝试。

恢复装配控制

相较于新机正常装配，整机试验分解、修理后的发动机装配，为满足后续试验需求或者验证某种修理措施，普遍会有额外的装配要求或控制措施。首先，试验和使用之后的零部件即使已经经过了检查和修理，但大部分情况下仍存在外观和局部尺寸的偏离，如涡轮盘经过高温作用产生的表面灼烧色、机匣安装边螺栓孔位的局部磨损、蜂窝结构椭圆度变大等，这些异常需要设计师单位评估确认后给出装机许可。其次，在试验和使用过程中的各类故障，依据相关研制规范及质量查处要求，必须要求将排故措施举一反三落实到其他台份，如零件结构设计改进而导致原装零件必须



图3 恢复装配的要点

更换、一些装配间隙的调整使得某一零件必须补加工。最后，根据后续试验要求，发动机上相关附件必须进行试验评估，确定具有足够的寿命后才能装机。图3列出了恢复装配时的一些控制点，这些控制点也是前文所述技术状态的一部分内容，每一项都需要经过严格的评估、实施与确认，可以为后续的试验奠定良好基础。

试验与修理的验证及评估

整机试验及过程中的分解检查、修理、恢复装配控制内容繁多，需要通过充分策划与实施。当试验过程中、附加的改进验证试验期间修理的零部件可满足使用要求，已制定的故障措施确实有效降低或杜绝了故障发生，控制系统改进后准确完成了特定指令处理与动作，便可验证相关修理技术方案、故障控制措施或改进改型研究的有效性和可靠性。

发动机核心部件的修理方案在整机试验时验证就极具代表性。压气机叶片裂纹、磨损等需要在修复后进行整机试验来确定实际工作状态下的性能，以验证其在高速旋转

和复杂气流环境下能否保持稳定的气动性能，不会出现异常的振动和效率下降；经表面涂层修复或强化处理的叶片需通过整机试验检验涂层在高温、高压、高速气流作用下的耐久性、可靠性，能否有效防止叶片的腐蚀和氧化。燃烧室经过局部修补或结构调整后，需通过整机试验验证在不同工况下燃烧过程是否均匀、火焰传播是否稳定以及排放物是否在规定范围内，对于那些会影响燃烧室内部气流和压力的维修操作，整机试验尤其有助于确定其对整体性能的影响。当涡轮叶片进行了空气通道清理、堵塞修理或表面热障涂层修复等操作，也需要整机试验验证修理后不同工况下的温度分布，检验冷却空气流量和压力是否合适，高温环境下能否对叶片基体产生足够保护，必要时还可验证诸如采用超声波清洗、强化涂层等新技术修理带来的影响。

此外，燃油控制系统、电子控制系统的硬件、软件升级或传感器更换等，往往也需要在整机环境下测试，确定系统响应、发动机控制、故障信号处置等各项工作。对于整机试验时确实难以验证的内容，往往还需要评估确定，验证与评估内容共同构成了整机试验通过的必要条件，除了上述的内容，通常还包括：对发动机维护检查方法和设备的评估，如孔探、X射线或其他专项检查方法，验证检查位置和通道的可达性与难易程度；拆装和更换可单独拆装的发动机单元体、组件和附件所用的时间和方法的验证；发动机分解和装配所使用的通用工具和专用工具适用性验证；发动机调整程序（控制系统、尾喷管、导

向叶片等）的验证；在使用中需要进行日常维护或相对频繁拆卸和更换的附件（如滑油滤、滑油箱口盖等）的可达性与难易程度验证/评估，评估发动机彻底分解、装配所用的时间和方法。

结束语

发动机复杂的修理维护工作可以拆解为准确的修理要求，协调高效的修理流程，以及经济、可靠的修理技术。这些内容需要在发动机全生命周期内进行大量而细致的工作，尤其在研发阶段的整机试验期间需要积累充分的经验数据并得到验证，包括修理部件、零件的分工调配与周期管控，易损、必换零件的设置与调换，相对于新机的装配间隙偏离许可，涂镀层分级分类的修复，局部新技术改进措施的落实时机策划等。在研发阶段的整机试验期间发掘和优化存在的修理提升点，可以极大程度决定发动机定型后的使用维护工作重点及价值量。 **航空动力**

（张美龙，中国航发动力股份有限公司，工程师，主要从事发动机装配及零部件裂纹、涂层、尺寸修复技术研究）

参考文献

- [1] 刘大响, 陈光. 航空发动机: 飞机的心脏 [M]. 2版. 北京: 航空工业出版社, 2015.
- [2] 空军装备研究院装备总体论证研究所. 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范: GJB 241A—2010 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2010: 12.
- [3] 中国航空综合技术研究所. 技术状态管理: GJB 3206B—2022 [S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2022: 8.