

文章编号: 1000-8055(2001)04-0305-04

以耐久性和损伤容限为中心的 现役发动机寿命控制方法

赵福星

(空军第一研究所, 北京 100076)

摘要: 本文在简述结构件和整机寿命常用控制方法的基础上, 结合我国实际着重论述了以耐久性和损伤容限为中心的现役发动机寿命控制方法的基本思想。提出了非单元体结构发动机整机寿命的关注点是翻修寿命而不是总寿命的观点。希望有助于推动损伤容限在现役发动机寿命控制中的应用。

关键词: 发动机; 寿命; 耐久性; 损伤容限

中图分类号: V 233.91

文献标识码: A

1 引言

耐久性和损伤容限评估(DADTA), 是 70 年代末在美国开始实施的发动机结构耐久性研究方法。它首先用于已服役多年的, 没有采用损伤容限设计的老发动机, 进行翻修寿命评定。通过耐久性和损伤容限评估, 可以确定翻修寿命和翻修厂的构件检查项目, 外场检查间隔和结构件检查项目, 制定发动机寿命控制方案。

我国现役发动机结构形式较老, 在整机上原位检查结构件完好性的可达性很差, 结构故障诊断手段也很少, 又不是单元体结构, 不可能在外场更换结构件。因此, 结构件的完好性检查, 绝大部分只能在翻修厂大分解后进行。外场可实施的结构件检查项目很少。这一特点, 对我军现役发动机寿命控制方案的制定影响很大。这意味着, 在寿命控制方案中, 翻修厂内的检查和修理工作是最核心、最关键的环节。

耐久性和损伤容限评估的一个重要技术基础, 是结构件的断裂分析。这方面研究工作, 国内虽有开展, 但可直接应用的成果很少。从应用的角度看, 这一工作的主要难点在于, 高温旋转件(涡轮盘、涡轮叶片、高压压气机盘等)的断裂分析。其中, 瞬态温度场测试和带裂纹件的裂纹扩展试验

最为困难。因此, 损伤容限评估在发动机寿命控制中的应用开展迟缓。从长远来看, 要科学地解决发动机中、后期寿命评定问题, 主要还是要靠耐久性和损伤容限评估。因此, 从现在起就要选定一个机型开展损伤容限寿命评定工作, 以推动这一工作的开展。

2 结构件的 4 种寿命控制方法

对应结构件断裂过程的两个基本阶段, 耐久性度量是初始寿命和扩展寿命。对于同一种结构件, 由于其抗疲劳和抗断裂能力的随机性, 初始寿命和扩展寿命也表现出随机性。按照寿命控制点的差别, 结构件的寿命控制方法分为 4 种:

(1) 安全寿命法: 以初始寿命的 $1/1000$ 概率点, 作为结构件种群寿命控制值的方法;

(2) 因故退役法: 以每个结构件的初始寿命, 作为其寿命控制值的方法(构件检出裂纹就报废的方法);

(3) 损伤容限法: 以每个结构件的损伤容限寿命, 作为其寿命控制值的方法;

(4) 状态监测法: 以每个结构件的失效点, 作为其寿命控制值的方法。它依靠状态监测及时发现失效的结构件;

以上 4 种控制法, 依次一种比一种寿命潜力

发挥得充分。显然, 状态监测法可以完全发挥零件的寿命潜力, 而安全寿命控制法显然会造成大量的寿命损失。但是, 状态监测法不能用于断裂关键件。

3 现役发动机两种使用寿命

从现役发动机的结构情况出发, 整机使用寿命有两个: 翻修寿命和总寿命。翻修寿命又可分为飞行小时寿命、日历寿命和循环寿命 3 种, 而总寿命一般只有飞行小时 1 种, 但也有不止一种的。

零部件寿命一般说来, 并不直接构成对整机使用总寿命的限制。因为在大修中, 几乎没有一个零部件是不可更换的。整机总使用寿命控制主要出于经济性、管理及技术更新等方面的考虑。安全和可靠性方面的考虑并不是主要的。发动机的安全和可靠使用, 主要是靠返修寿命控制来保证的。以耐久性和损伤容限评估为中心的现役发动机寿命控制, 就是用来研究确定翻修寿命、主要零部件寿命控制方法和内外场维修项目的。

零部件的耐久性和损伤容限, 是确定整机翻修寿命的基础。特别是热端零部件的耐久性和损伤容限尤其重要, 往往就是整机翻修寿命的决定因素。为了使整机翻修寿命不至于太短, 可以通过对发动机使用限制来适当延长整机翻修寿命, 经常用的限制是大状态单次工作时间和总工作时间比例。

4 耐久性和损伤容限评定的工作任务

从我国国情出发, 把现役发动机零部件的耐久性和损伤容限评定概括为以下 6 项工作任务。

4.1 发动机及主要结构件的载荷谱的确定

载荷谱作为发动机及其结构件的应力环境, 是结构件应力分析、零部件寿命试验和发动机耐久性试验的依据。

工作内容包括: (1) 任务混频调查; (2) 飞行剖面测试; (3) 零部件表面温度场测试; (4) 整机及主要结构件的载荷谱编制。

4.2 结构件应力分析和危险部位的确定

通过结构件应力分析和实际使用经验, 确定结构件的危险部位。根据危险部位的失效性质(疲劳、腐蚀疲劳、应力腐蚀、屈曲、应力断裂、蠕变等), 失效后果分析, 确定失效的危险程度, 进而将主要结构件区分为断裂关键件和耐久性关键件。

并为损伤容限分析打下基础。

工作内容包括: (1) 高温主要结构件温度场分析; (2) 主要结构件应力分析; (3) 外场使用中, 因结构件失效而引起的事故和故障统计分析; (4) 翻修中, 结构件失效和损伤统计分析; (5) 确定主要结构件的危险部位; (6) 主要结构件的失效后果分析, 确定断裂关键件和耐久性关键件。

4.3 无损检测能力评估

无损检测是发动机翻修质量的基本保障之一, 也是外场维护的重要手段。以耐久性和损伤容限评估为中心的现役发动机寿命控制, 主要依靠内、外场的周期性无损检测, 来发现有故障或有故障隐患的结构件。因此, 无损检测能力评估十分重要。

评估的对象: 翻修厂和外场维护部队。

无损检测能力评估的目标是: (1) 在现行工艺流程下, 各个检测部位的可检裂纹或损伤尺度。(2) 实验评估现行检测方法和工艺的可靠性。

4.4 关键机构件的耐久性和损伤容限分析

此项工作的目标: 确定关键机构件的安全寿命和检测周期。

主要工作: (1) 关键件危险点的耐久性(包括疲劳和持久)分析; (2) 可检断裂关键件危险点的断裂分析; (3) 断裂关键件的疲劳和断裂试验; (4) 重点可检耐久性关键件危险点的断裂分析; (5) 确定可检断裂关键件的检查点和检查周期(6) 确定可检重点耐久性关键件的检查点和检查周期; (7) 利用使用中失效统计分析关键件的耐久性寿命; (8) 利用使用中失效件的断口或裂纹长度统计进行断裂分析。

4.5 耐久性散度分析

此项工作的目的是分析各种因素对耐久性的影响。

工作包括:

(1) 飞行载荷的散度影响分析: 发动机载荷谱的特点: 应力环境的强度方面散度较小, 在构件的耐久性和损伤容限分析中, 可以不考虑应力环境的强度方面的散度; 但是在持续时间或重复次数方面散度较大, 必需考虑, 在具体散度未知时, 可以按平均载荷谱的两倍来处理。在应力环境的强度方面, 不同飞行条件下, 构件温度问题要给予特别关注, 注意其与构件试验和台架试验时的可能差异。

(2) 大气环境的散度影响分析: 对于高热高湿

地区和高工业污染地区, 一般需要考虑腐蚀作用, 构件的耐久性和损伤容限需另行分析, 必要时单独给出寿命。

(3) 生产批次的质量差异影响分析: 现役发动机大部分机型生产已多年, 批次较多, 需对各批次进行结构差异分析, 工艺改动分析, 工艺质量控制对耐久性和损伤容限的影响分析。要特别注意事故检查和失效分析中反映出的有关批次问题。

(4) 公差影响分析

(5) 材料的散度影响分析

(6) 修理工艺影响分析: 在大修中, 构件形状的局部改变, 影响耐久性, 有时甚至影响失效模式。修理导致的涡轮前温度提高, 对热端构件的耐久性的影响也要注意。

4.6 耐久性增长

现役发动机的耐久性增长, 是延寿的最主要手段。针对发动机的薄弱环节, 特别是针对事故和故障中暴露出的薄弱环节, 提高耐久性可以取得事半功倍的效果。

主要工作包括: (1) 结构件设计和制造工艺改进; (2) 修理中局部结构改进、结构件强化和防护改进, 如几何不连续处的光滑处理, 增加表面喷丸和耐热或耐腐蚀涂层, 超应力处理, 补充热处理等。

5 发动机整机寿命控制方案的制定

以耐久性和损伤容限为中心的寿命控制思想认为, 非单元体结构发动机整机寿命的关注点是翻修寿命。核心是确定安全合理的翻修寿命, 制定一整套与之相适应的维修措施。受翻修成本限制的总寿命, 与之相比, 并不重要, 其确定过程, 基本上是一个经济寿命分析过程。

科学的修理工艺, 是翻修寿命期内发动机使用安全的最重要、最基本的保证。在翻修中, 可检断裂关键件和耐久性关键件, 受到严格地检测, 依照损伤容限或因故退役方法, 被适时更换; 不可检断裂关键件, 依照给定的安全寿命, 被及时更换; 其他零部件按照修理标准进行修理或报废处理。与以往的翻修不同的是增加了零部件更换的损伤容限和因故退役控制, 使关键件的更换更加合理, 使用更加安全。

合理的外场检测和监测, 也是翻修期内发动机使用安全的重要保证, 是以耐久性和损伤容限为中心的寿命控制的, 重要组成部分。振动测试、滑油金属含量分析、无损检测、孔探仪检查、发动

机极限参数检测等均属外场检测或监测范畴。另外, 飞参记录仪和历程记录器在寿命记录中的应用, 可以更准确地记录发动机的不同类型的损伤, 使翻修周期控制参数更加合理。

以耐久性和损伤容限为中心的寿命控制, 使寿命控制活动更多地集中到关键结构件, 特别是断裂关键件上。结构件的耐久性和损伤容限评估, 使寿命控制活动更准确、更有效。

结构件的耐久性和损伤容限评估, 为关键件的寿命控制奠定了基础。需要制定一个选择程序, 以确定关键件及其最有效的寿命控制方法。其中要考虑失效模式、后果影响、可测度及与整机寿命的关系等。

在关键件的寿命控制方法确定之后, 整机使用寿命控制就变得比较容易了。主要工作是:

(1) 确定翻修周期: 主要受外场不可检的, 内场检测周期最小的断裂关键件的检测周期限制。如果有不可检的断裂关键件的安全寿命, 小于预定检测周期, 则要按照该关键件的安全寿命确定翻修周期。

(2) 确定内、外场维修活动: 关键件的内、外场维修活动在结构件的耐久性和损伤容限评估工作中已经确定。这里需要按照以可靠性为中心的维修思想, 补充确定非关键件的内、外场维修活动。

6 几个特殊问题

在耐久性和损伤容限评估中, 有几个特殊问题需要说明。这几个特殊问题, 都是耐久性和损伤容限评估中的难点。

6.1 高压转子盘的瞬态表面温度场测试及危险点的最大应变范围的确定

由于高压转子无自由端, 信号传输比较困难。用刷环引电要两次转接, 可靠性较低, 发动机改装工作量大, 误差较大。无线传输的发射机安装上也比较困难。须改进信号传输技术。

涡轮盘危险点的残余应力, 是工作应力应变过程的影像。通过它, 可以确定飞行中最大应变范围。在很大程度上, 可以弥补涡轮盘温度应力难以确定的缺憾。这方面, 已作过一些研究, 需要开展这方面进一步的研究工作。

6.2 涡轮盘裂纹扩展速度试验

由于涡轮盘实验室温度应力难以模拟, 所以涡轮盘裂纹扩展速度的实验室试验是难以进行的。可以考虑用台架试车代替。对于高故障率的

涡轮盘用外场统计分析计算扩展速度代替,可能更加可靠。在我国有两种涡喷发动机涡轮盘榫齿裂纹和一种涡轮盘槽底裂纹的扩展速度试验,都是通过带裂纹盘的台架长试进行的。

6.3 高应力梯度点的寿命计算

实际使用的旋转件上的危险点,一般处于应力集中部位。在这些部位,有的应力梯度较大,用局部应力应变法,计算寿命误差较大,需要发展通用于应力疲劳和应变疲劳的寿命计算方法,即考虑应力梯度的局部应力应变寿命算法。

6.4 “不可检轮盘”的超速检验

用无损检测方法难以检测出裂纹的“不可检轮盘”,是损伤容限控制全面贯彻的重要障碍。可以探索利用材料冷脆性,进行超速检验的有可能解决这一难题。

以耐久性和损伤容限为中心的寿命控制,做为一种系统的寿命控制方法,在国外提出虽然历史不太长。但是,其基本思想由来已久。在我国,早已在老机寿命控制中应用。如前面已经提到的

发动机涡轮盘槽底裂纹和榫齿裂纹修理标准,都是 20 世纪 60, 70 年代制定的,是损伤容限思想在我国应用的先驱。应该特别指出的是,这些修理标准的制定是在断裂力学传入我国之前,完全凭经验完成的。可以说,即使在今天,完全靠理论计算和实验室试验,也是难以制定出上述 3 个修理标准的。这说明,损伤容限的思想和实践经验在损伤容限分析中起着十分重要的作用。只要解放思想,大胆实践,严密组织,实践—理论—实验三结合,在现役发动机上,实现以耐久性和损伤容限为中心的寿命控制,是大有希望的。

参考文献

- [1] 606 所 航空发动机耐久性与损伤容限研究技术文集[R]. ENSIP 情报研究, 1993
- [2] 赵福星 零件最大工作循环的残余应力确定法[C]. 第六届发动机结构强度振动学术会议论文集, 1992

(责任编辑 王震华)

A Durability and Damage Tolerance Centered Approach to Life Control of In-Service Engines

ZHAO Fu-xing

(First Airforce Research Center, Beijing 100076, China)

Abstract: On the basis of the life control methods in common use for aircraft engines and structures, a durability and damage tolerance centered approach is presented for the life control of in-service aircraft engines in consideration of the reality in China. It is pointed out that the focus of interests for the life of non-modular engines should be put on the time between overhaul (TBO) rather than on the total life, with special emphasis on the role of the concept and practical experience of damage tolerance in the analysis. The technical difficulties in assessing durability and damage tolerance are briefly considered. It is expected that this paper will facilitate the application of damage tolerance assessments to the life control of in-service engines.

Key words: engine; life; durability; damage tolerances