

航空涡喷、涡扇发动机

主要零部件定寿指南

主 编 苏清友

副主编 孔瑞莲 陈筱雄 陶增元

王延荣 李 伟

航空工业出版社

87.8546
261

航空涡喷、涡扇发动机 主要零部件定寿指南

苏清友 主编

江苏工业学院图书馆
藏书章

航空工业出版社

内 容 提 要

航空发动机作为飞机的心脏,其可靠性和寿命是至关重要的。本书是作者在总结“七五”、“八五”、“九五”以来对现役机种主要零部件寿命研究成果的基础上,又注意吸纳国内外有关寿命研究最新资料编写而成的航空发动机工程领域中的技术专著。本书全面系统地介绍了有关航空发动机主要零部件的定寿理论、试验研究和评估方法。分章阐述了军用航空发动机载荷谱、航空发动机主要零部件材料的力学性能、压气机转子叶片、涡轮转子叶片、压气机轮盘、涡轮盘、轴、机匣等的定寿方法及航空发动机寿命与寿命管理等内容,内容新颖、通俗易懂、实用性强。本书不仅是航空发动机生产厂、研究所、空军与海军修理厂和使用单位、上级主管部门的工程技术人员、管理人员及高等院校相关专业师生的技术工具书,也可供从事巡航导弹、舰船等燃气轮机动力装置的研制、生产、使用、管理的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空涡喷、涡扇发动机主要零部件定寿指南/苏清友主编.—北京:航空工业出版社,2004
ISBN 7-80183-356-2

I.航… II.苏… III.①涡轮喷气发动机-零部件-疲劳寿命估算②涡轮风扇发动机-零部件-疲劳寿命估算 IV.V235

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第033922号

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2004年2月第1版

2004年2月第1次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:24.75

字数:630千字

印数:1—1500

定价:50.00元

航空涡喷、涡扇发动机主要零部件定寿指南

主 编

苏清友

副主编

孔瑞莲 陈筱雄 陶增元 王延荣 李 伟

主 审

李其汉 朱梓根 饶寿期 李冬炜

前 言

航空发动机是一种具有严酷的气动负荷、机械负荷作用,且要求耐久性工作特征的热动力机械,是由许多零部件和附件组成的复杂系统,其可靠性和寿命直接影响着飞行的安全性。航空发动机的寿命,很大程度上取决于主要零部件的寿命,当这类零部件中的任何一件一旦发生破坏均可能造成灾难性或致命性的事故,所以国内外均很重视航空发动机主要零部件的可靠性和寿命研究。

美、英等发达国家开展航空发动机可靠性设计和主要零部件寿命研究起步较早,现已达到成熟阶段。而我国由于涉足该领域研究较晚,差距比较大,严重制约着发动机的研制、使用和发展,已引起有关领导的高度重视。《航空涡喷、涡扇发动机主要零部件定寿指南》(以下简称《定寿指南》)一书的出版,对加速我国航空发动机主要零部件寿命研究工作的开展有着重要的现实意义。

《定寿指南》是在现役机种主要零部件寿命研究成果的基础上,对发动机主要零部件进行寿命预计、试验、评估、管理等技术的总结。因为发动机的主要零部件是制约发动机安全性、使用性、维修性的关键或重要零部件,其寿命长短不仅影响发动机的使用,也影响发动机的维修费用、后勤保障等。为此,“七五”以来在中国人民解放军空军装备部订货部的领导下,由空军航空技术装备可靠性办公室具体组织实施,重点对 WP7 系列、WP13 系列、WP8 系列等发动机的主要零部件进行了寿命研究和试验验证工作,现已陆续验收和鉴定,取得了丰硕的技术成果。为了使这些研究成果在军机设计、生产、使用、管理中得到推广应用,空军装备部订货部特决定编写出版《定寿指南》。

《定寿指南》一书属于航空发动机工程领域的技术专著,其主要特点是理论联系实际,尤其是紧密联系我国的实际,具有较强的系统性、针对性和可操作性,具有较高的学术水平和重要的工程应用价值,具体体现在:

- (1) 科学地反映了现役发动机主要零部件定寿和寿命增长的研究水平;
- (2) 如实地反映出 20 世纪 90 年代以来我国航空发动机结构、强度试验设备、试验方法和测试技术的水平;
- (3) 提出了符合国情、工程实用的、比较完整的寿命预计、试验、评估技术和方法;
- (4) 对发动机主要零部件寿命研究工作具有重要的指导和推广价值,也为上级主管部门和管理人员进行技术决策提供科学依据。

综上所述,《定寿指南》的编写是“七五”以来发动机主要零部件寿命研究成果和经验的总结;是各单位结合设计、生产、使用、管理的具体情况,开展相关科研活动所获成果的升华;也是通过国内外信息交流和吸收引进新技术成就的凝聚。本书主要针对发动机主要零部件,介绍其载荷谱的编制、安全寿命的预测、寿命试验、评估、管理等方面的理论和方法。分章阐述了军用航空发动机载荷谱,航空发动机主要零部件材料的力学性能、压气机转子叶片、涡轮转子叶片、压气机轮盘、涡轮盘、轴、机匣等的定寿方法及航空发动机寿命与

寿命管理等。本书不仅是航空发动机生产厂、研究所、空军与海军修理厂和使用单位、上级主管部门的工程技术人员、管理人员及高等院校相关专业师生的技术工具书，也可以供从事巡航导弹、舰船等燃气轮机动力装置的研制、生产、使用、管理的工程技术人员参考。

全书共分十章。其中第1章由洪其麟执笔；第2章由李伟、赵福星、梁世昌、吴向宇等执笔，杨士杰审；第3章由何玉怀、陶春虎执笔，杨士杰审；第4章由陈士煊、黄耀祖执笔，聂景旭审；第5章由高庆、袁小卫执笔，王聚、肖波审；第6章由蔚夺奎执笔；第7章由龚梦贤执笔；第8章由靳焕章、纪永汉、靳辉、李伟执笔，杨晓光审；第9章由范引鹤、黄耀祖、蔚夺奎执笔，聂景旭审；第10章由陶增元、陈筱雄执笔。

全书由李其汉、朱梓根、饶寿期、李冬炜主审。

在本书的编写与出版过程中，得到了空军装备部订货部领导的大力支持和帮助，原空军技术装备可靠性办公室主任吕志刚、李立人、张文健，中国科学院金属所田继风、姚戈，北京航空航天大学熊昌炳教授、石多奇博士、王博、肖磊、白露、王巧杰、郭立等硕士，以及驻京昌地区军代表室王健，空一所、空军修理研究所、沈阳航空发动机研究所、中国燃气轮机研究院、北京航空材料研究院、贵州航空发动机研究所、成都发动机集团有限公司及驻厂军代表室，南京航空航天大学、北京航空航天大学等单位领导和同仁给予了大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

《定寿指南》是在“七五”以来军用航空发动机主要零部件寿命研究成果的基础上编写而成的，是对航空发动机零部件定寿理论和方法的初步研究，不足之处还有待于在使用中进一步研究、完善，以便在不久的将来编辑出版更为规范、实用的“航空发动机定寿指南”。

编著者

2003年9月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 编写的目的和意义	(1)
1.2 航空发动机寿命研究的演变	(1)
1.2.1 整机长期试车定寿	(1)
1.2.2 安全(疲劳)寿命定寿	(2)
1.2.3 损伤容限定寿	(2)
1.3 “七五”以来主要零部件定寿的指导思想	(3)
1.4 发动机定寿的要素和技术途径	(3)
1.4.1 航空发动机定寿五要素	(3)
1.4.2 主要零部件定寿七步骤	(4)
1.4.3 航空发动机整机定寿四步骤	(4)
1.5 本书研究的内容	(5)
第 2 章 发动机载荷谱	(6)
2.1 概述	(6)
2.1.1 发动机载荷谱研究的基本概念和内容	(6)
2.1.2 发动机载荷谱在发动机研制和寿命研究中的地位与作用	(8)
2.1.3 确定发动机载荷谱的基本技术途径	(11)
2.2 任务混频和环境混频	(12)
2.2.1 任务混频	(12)
2.2.2 环境混频	(18)
2.3 发动机飞行剖面获取	(21)
2.3.1 用飞行参数记录仪获取发动机飞行剖面	(21)
2.3.2 发动机飞行剖面的专门测试	(23)
2.3.3 飞行剖面的后处理	(24)
2.3.4 飞行剖面的典型化	(25)
2.4 涡喷/涡扇发动机飞行剖面的转换	(28)
2.4.1 飞行剖面的转换条件	(28)
2.4.2 剖面转换方法	(28)
2.5 台架试车条件下主要零部件载荷测试	(33)
2.5.1 台架测试载荷的作用和意义	(33)
2.5.2 整机台架载荷测试的参数	(33)
2.5.3 主要零部件载荷台架测试的关键技术	(34)
2.6 发动机内流与热分析	(46)
2.6.1 内流与热分析的内容	(46)

2.6.2	技术途径	(46)
2.6.3	原始数据	(46)
2.6.4	计算分析方法要点及算例	(47)
2.7	发动机整机载荷谱的编制	(49)
2.7.1	整机载荷谱编制与飞行剖面数据处理	(49)
2.7.2	环境任务载荷参数矩阵的编制	(50)
2.7.3	外部作用力	(54)
2.7.4	整机载荷谱编制实例	(54)
2.7.5	整机载荷谱的使用	(56)
2.8	发动机载荷谱的均值误差和散度分析	(60)
2.8.1	载荷参数均值误差的诸因素分析	(60)
2.8.2	载荷谱均值误差和散度分析的基本方法	(61)
第3章	航空发动机主要零部件材料的力学性能	(64)
3.1	材料力学性能在发动机设计与定寿中的地位	(64)
3.2	发动机主要零部件设计定寿中的材料问题	(64)
3.3	材料力学性能的基本概念	(66)
3.3.1	常规力学性能	(66)
3.3.2	应力疲劳与应变疲劳	(67)
3.3.3	疲劳裂纹扩展	(67)
3.3.4	断裂韧度	(67)
3.3.5	持久/蠕变	(67)
3.3.6	疲劳/蠕变交互作用	(68)
3.3.7	应力腐蚀	(68)
3.4	材料力学性能常用量符号	(69)
3.5	材料力学性能数据的表达准则	(71)
3.5.1	与材料力学性能有关的统计学概念	(71)
3.5.2	材料力学性能数据的要求与获得	(71)
3.5.3	材料力学性能数据的分析处理与表达	(79)
3.6	零部件设计与定寿对材料力学性能数据的要求	(85)
3.6.1	性能可靠度要求	(85)
3.6.2	试件要求	(85)
3.6.3	轮盘定寿对材料力学性能数据的要求	(86)
3.6.4	轴定寿对材料力学性能数据的要求	(86)
3.6.5	叶片定寿对材料力学性能数据的要求	(87)
3.6.6	机匣定寿对材料力学性能数据的要求	(88)
3.6.7	燃烧室定寿对材料力学性能数据的要求	(88)
3.7	发动机主要零部件典型材料的力学性能数据示例	(88)
3.7.1	常规力学性能	(88)
3.7.2	持久和蠕变性能	(95)

3.7.3 应力疲劳性能	(100)
3.7.4 应变疲劳性能	(107)
3.7.5 疲劳裂纹扩展	(110)
3.7.6 断裂韧度	(110)
3.7.7 应力腐蚀性能	(110)
第 4 章 压气机转子叶片的定寿方法	(111)
4.1 概述	(111)
4.1.1 压气机转子叶片的损伤与寿命	(111)
4.1.2 压气机转子叶片寿命研究的意义	(113)
4.1.3 压气机转子叶片寿命研究的技术途径	(114)
4.2 压气机转子叶片寿命研究的特殊性	(115)
4.2.1 高循环疲劳应力谱在寿命研究中的不平稳性	(115)
4.2.2 使用环境在寿命研究中的关键作用	(116)
4.2.3 定期维修在寿命研究中的地位	(118)
4.3 压气机转子叶片故障模式及其分析	(119)
4.3.1 WP7 系列压气机转子叶片现行检查标准 (含判废标准)	(119)
4.3.2 WP7 系列压气机转子叶片因故报废的统计分析	(120)
4.4 剩余疲劳强度理论的基本概念	(124)
4.4.1 损伤物理量——剩余疲劳强度及其衰减比	(124)
4.4.2 损伤极限的许用量	(125)
4.4.3 损伤累积和修复的过程	(127)
4.5 振动疲劳试验及有关分析	(127)
4.5.1 叶片振动疲劳试验设备系统简介	(128)
4.5.2 试验叶片的选取	(128)
4.5.3 转子叶片的频差对比检验	(129)
4.5.4 转子叶片的试验	(131)
4.5.5 微动疲劳现象在试验中的表现及其分析	(133)
4.6 压气机转子叶片的寿命预估及综合评述	(134)
4.6.1 “基准”环境状态和叶片寿命定义	(134)
4.6.2 寿命预估过程的分析	(135)
4.6.3 综合评述	(138)
第 5 章 涡轮转子叶片的定寿方法	(140)
5.1 概述	(140)
5.1.1 涡轮转子叶片寿命研究的意义	(140)
5.1.2 影响涡轮转子叶片寿命的主要因素	(141)
5.1.3 涡轮转子叶片定寿的方法和技术途径	(142)
5.2 故障模式及其分析	(142)
5.2.1 涡轮转子叶片判废标准及报废统计	(142)

5.2.2	涡轮转子叶片使用情况统计方法	(147)
5.2.3	涡轮转子叶片的主要故障模式及影响分析	(148)
5.3	载荷的确定	(149)
5.3.1	涡轮转子叶片寿命研究的载荷要求	(149)
5.3.2	涡轮转子叶片载荷谱的确定	(151)
5.4	低循环疲劳/蠕变寿命的预测分析	(155)
5.4.1	寿命预测的理论依据	(155)
5.4.2	寿命预测计算公式及相关的材料数据	(157)
5.4.3	涡轮转子叶片寿命预测的实施方法和程序	(157)
5.4.4	振动影响的分析	(165)
5.5	低循环疲劳/蠕变寿命试验及数据处理	(167)
5.5.1	台架挂片试验	(167)
5.5.2	试验器上加载试验	(168)
5.5.3	阶段使用后叶片的剩余寿命试验	(178)
5.6	寿命的综合评定	(178)
5.6.1	涡轮转子叶片寿命综合评定方法	(178)
5.6.2	涡轮转子叶片实际使用寿命	(179)
5.7	涡轮转子叶片技术寿命的确定——方法总结	(180)
第 6 章	压气机轮盘的定寿方法	(181)
6.1	概述	(181)
6.2	故障模式及其分析	(182)
6.2.1	国内外发动机压气机轮盘故障及其分析	(182)
6.2.2	故障分析与排故方法	(182)
6.2.3	压气机轮盘故障的 FMEA 分析	(185)
6.3	低循环疲劳载荷确定	(186)
6.3.1	强度、寿命计算点的确定	(186)
6.3.2	循环载荷的确定	(189)
6.4	低循环疲劳寿命预测	(195)
6.4.1	低循环疲劳寿命预测方法综述	(195)
6.4.2	低循环疲劳寿命预测程序	(211)
6.5	低循环疲劳寿命试验及其数据处理	(214)
6.5.1	低循环疲劳寿命试验参数确定	(214)
6.5.2	低循环疲劳寿命试验件的选取	(215)
6.5.3	低循环疲劳寿命试验件的试验检查	(215)
6.5.4	低循环疲劳寿命试验方法	(215)
6.5.5	WP7 系列发动机高压压气机转子低循环疲劳寿命试验	(218)
6.6	寿命的综合评定	(220)
6.6.1	压气机轮盘寿命的影响因素分析	(220)
6.6.2	课目换算率	(221)

6.6.3 平均飞行换算率	(223)
6.6.4 压气机轮盘的寿命确定	(223)
第7章 涡轮盘的定寿方法	(225)
7.1 概述	(225)
7.1.1 涡轮盘定寿的内容	(225)
7.1.2 国外的涡轮盘定寿方法	(227)
7.1.3 国内的涡轮盘定寿方法	(231)
7.1.4 涡轮盘定寿方法建议	(234)
7.2 故障模式及其分析	(236)
7.2.1 常见的故障模式	(236)
7.2.2 涡轮盘典型故障模式实例	(237)
7.2.3 涡轮盘故障模式分类	(242)
7.3 低循环疲劳/蠕变载荷的确定	(243)
7.3.1 涡轮盘低循环疲劳载荷的确定	(243)
7.3.2 涡轮盘蠕变载荷的确定	(244)
7.3.3 示例	(245)
7.4 低循环疲劳/蠕变寿命预测分析	(246)
7.4.1 涡轮盘低循环疲劳寿命预测	(246)
7.4.2 涡轮盘蠕变寿命预测	(249)
7.4.3 示例	(255)
7.5 低循环疲劳/蠕变寿命试验及其数据处理	(258)
7.5.1 涡轮盘低循环疲劳寿命试验	(258)
7.5.2 涡轮盘蠕变寿命试验	(261)
7.5.3 示例	(264)
7.6 寿命的综合评定	(267)
7.6.1 涡轮盘的飞行换算率	(267)
7.6.2 涡轮盘定寿中的可靠性分析	(272)
7.6.3 示例	(273)
第8章 主轴的定寿方法	(274)
8.1 概述	(274)
8.1.1 基本概念	(274)
8.1.2 技术途径	(275)
8.2 故障模式及其分析	(276)
8.2.1 故障模式	(276)
8.2.2 影响程度	(276)
8.2.3 原因分析	(276)
8.3 疲劳载荷谱的确定	(276)
8.3.1 主轴疲劳载荷的确定方法	(277)

8.3.2	主轴标准循环载荷的确定	(279)
8.3.3	主轴飞行换算率的计算	(281)
8.4	主轴应力分析	(282)
8.4.1	有限元应力分析	(282)
8.4.2	光弹性应力分析	(283)
8.5	疲劳寿命的预测方法	(284)
8.5.1	大扭矩为主载荷的寿命预测方法（即“斯贝发动机应力标准”法）	(285)
8.5.2	大弯矩为主载荷的寿命预测方法（WP6 轴使用方法）	(295)
8.5.3	复合载荷下的寿命预测方法（WP7 轴使用方法）	(297)
8.6	疲劳寿命试验	(302)
8.6.1	试验方法	(302)
8.6.2	疲劳试验中散度系数的确定	(303)
8.6.3	试验载荷的确定	(304)
8.6.4	边界条件模拟	(305)
8.6.5	载荷模拟	(305)
8.6.6	子样的选取原则	(307)
8.6.7	试验程序	(307)
8.6.8	试验数据处理	(308)
8.7	寿命的综合评定	(308)
8.7.1	安全循环寿命	(308)
8.7.2	飞行小时寿命	(309)
8.8	WP7 发动机高压涡轮轴安全寿命的确定	(309)
8.8.1	标准循环载荷谱的确定	(309)
8.8.2	应力分析	(310)
8.8.3	疲劳寿命预测分析	(315)
8.8.4	疲劳试验	(315)
8.8.5	寿命的综合评定	(320)
第 9 章	机匣的定寿方法	(323)
9.1	概述	(323)
9.1.1	机匣疲劳寿命研究的意义	(323)
9.1.2	研究方法	(323)
9.1.3	技术途径	(324)
9.2	故障调研及其分析	(326)
9.2.1	机匣故障模式的统计及数据分析	(326)
9.2.2	典型故障发生的原因、影响及防止措施	(329)
9.2.3	判废标准及修理方法	(332)
9.3	低循环疲劳载荷的确定	(333)
9.3.1	各种机匣承受的载荷	(334)
9.3.2	标准循环载荷的确定方法	(336)

9.3.3 飞行换算率的确定	(336)
9.3.4 WP7 燃烧室机匣低循环疲劳载荷的确定	(337)
9.4 低循环疲劳寿命预测	(339)
9.4.1 局部应力—应变法	(339)
9.4.2 WP7 发动机燃烧室外套寿命预测	(343)
9.5 低循环疲劳寿命试验及其数据处理	(345)
9.5.1 焊接接头的疲劳试验	(346)
9.5.2 局部应力模拟疲劳试验	(347)
9.5.3 全尺寸燃烧室机匣低循环疲劳试验	(352)
9.6 寿命综合评定	(355)
9.6.1 寿命分散系数	(355)
9.6.2 WP7 发动机燃烧室机匣的低循环疲劳寿命	(356)
9.6.3 讨论	(357)
 第 10 章 航空发动机寿命与寿命管理	 (358)
10.1 概述	(358)
10.1.1 航空发动机寿命	(358)
10.1.2 航空发动机的寿命管理	(359)
10.2 发动机的定寿与延寿	(360)
10.2.1 发动机定寿	(360)
10.2.2 发动机延寿	(361)
10.3 发动机的寿命评估	(362)
10.3.1 总述	(362)
10.3.2 寿命评估法	(363)
10.3.3 寿命评估的内容和程序	(364)
10.3.4 寿命评估的流程图	(366)
10.4 视情维修发动机的单元体结构	(367)
10.4.1 发动机的视情维修	(367)
10.4.2 视情维修与状态监视系统	(367)
10.4.3 视情维修与单元体结构	(368)
10.4.4 发动机单元体寿命	(368)
10.5 航空发动机的寿命管理	(369)
10.5.1 航空发动机寿命的行政管理	(369)
10.5.2 航空发动机寿命的技术管理	(374)
 参考文献	 (380)

第1章 绪论

1.1 编写的目的和意义

“七五”以来,在中国人民解放军空军装备部订货部的领导下,由空军航空技术装备可靠性办公室具体组织实施,重点对在役的 WP7 系列发动机的主要零部件进行了寿命研究和试验验证工作。为了提高工程研究项目的质量,以这些发动机的生产、使用、修理信息及我国国情为依据,继承以前的有益经验,借鉴国外先进方法,坚持“试验研究和理论分析相结合、整机试车和关键构件试验相结合、对使用和修理信息高度重视”三原则,走适合国情、具有我军特色的研究路线,取得了一批优秀的研究成果。

从“七五”到“九五”期间,在发动机寿命研究方面,共计完成 40 余项研究课题。为了深入、系统地总结“七五”以来航空发动机寿命研究工作的经验和成果,并将涉及到的新技术、新方法和新经验进一步升华,以提供一套符合我国国情的、较为完整的、工程实用的寿命分析和试验评定的参考书,特此编写《航空涡喷、涡扇发动机主要零部件定寿指南(研究报告)》(以下简称《定寿指南》),以供有关发动机研制、生产、使用和管理人员参考。希望借以克服研制工作中的薄弱环节,提高技术水平,将我国航空发动机寿命研究工作推进到更新的阶段。

1.2 航空发动机寿命研究的演变

1.2.1 整机长期试车定寿

在 20 世纪 50 年代以前,由于航空发动机研制经验不足,普遍使用整机长期试车的小时数来确定翻修期限,以保证发动机使用的可靠性。通常由承制方将随机抽样的发动机在地面试车台上进行长期试车。

如果在设计、材料、冷热加工方法和热处理规范方面对发动机主要零部件作过某些变动,还应进行长期试车,以考核修改零部件是否能达到规定的翻修期限。

以严格控制翻修期限的方法来保证发动机使用的可靠性,虽然沿用了很长时间,而且目前在某些国家、某些产品上仍然使用,但是采用这种方法却存在以下弊端:

(1) 发动机地面台架的试车条件与实际飞行条件有一定的差别,有时差别还相当大。因而,通过长期试车后,仍可能在实际使用中出现某些故障;而在长期试车中出现的某些问题,在实际使用中并不一定出现。

(2) 发动机在翻修分解及在使用中的飞行记录表明,大量发动机使用到规定的翻修期限后,仍能继续正常工作,这就造成了使用中的浪费。但也有不少发动机在规定的翻修期限内出现故障,这就造成了使用中的风险。

(3) 由于发动机翻修期限愈来愈长,如果进行全寿命试车,既费时更费钱。另外,随着

翻修期限加长,只考虑发动机的工作小时数就不够了,还必须考虑发动机的循环次数。因此,同一发动机在使用工况不同时,其翻修期限自然差别很大。由于发动机的用户不同,其使用及维护经验也不同,因此,即使对于同一型号的发动机,其使用寿命往往相差相当大。

为了延长发动机使用寿命,在 20 世纪 50 年代后期,美、英等国提出了“先锋批样机检查定寿法”。英国的具体做法是:在一批服役的发动机中,当有 25% 首先达到翻修期限时,及时对这些发动机分解检查,如果情况良好,则这批发动机(包括未到寿的其余 75%)可以申请延长寿命 25%。这种检查先锋批样机的方法可以继续使用若干次。

长期试车定寿在过去相当长的时间内起了很大的作用,因为当时飞机的飞行速度较低,主要零部件结构的应力水平较低,强度储备较大,且要求发动机的使用寿命不长,致使相当数量的疲劳问题被掩盖。随着飞机飞行速度加快,发动机使用寿命加长,强度储备降低,致使主要零部件的疲劳损伤日趋严重。同时考虑到主要零部件寿命在很大程度上决定了整机寿命,主要零部件定寿才是整机定寿的基础,因而发展了主要零部件的安全(疲劳)寿命定寿和损伤容限定寿。

1.2.2 安全(疲劳)寿命定寿

1.2.2.1 高循环(应力)疲劳定寿

无任何缺陷的构件在循环应力、应变作用下,在应力集中部位容易产生较大的累积损伤,在该部位以一定的概率出现长度为 0.78mm 的表面裂纹或使构件失效的循环次数被称为疲劳寿命。通常对构件局部最大应力小于材料屈服极限、疲劳失效循环次数大于 10^5 者称为高循环疲劳。高循环疲劳定寿通常用材料或构件的循环应力—寿命曲线(即 $S-N$ 曲线)完成,在航空发动机工程上比较适用的资料为英国罗罗公司制定的《斯贝 MK202 发动机应力标准》(EGD-3)。在本书第 8 章中,主轴定寿主要采用了这种方法。

高循环疲劳设计通常又可分为无限寿命设计和有限寿命设计两种,前者是当作用在构件上的最大循环应力不大于构件的疲劳极限且考虑一定的裕度的设计,被称为无限寿命设计;后者是当作用在构件上的最大循环应力大于构件的疲劳极限且考虑一定的裕度的设计,被称为有限寿命设计。

对于航空发动机的主要零部件,有时根据需要或条件限制(研制周期、减轻重量)等因素,通常采用有限寿命设计。

1.2.2.2 低循环(应变)疲劳定寿

因为航空发动机主要构件的形状很复杂,同时所承受的载荷也很大,因而当构件局部最大应力大于材料屈服极限,而其疲劳失效循环次数小于 10^5 时,则称此为低循环疲劳寿命。低循环疲劳定寿常用无缺陷材料和构件的循环应变—寿命曲线(即 $\epsilon-N$ 曲线)完成,常用的方法有 Manson-Coffin 法或局部应力—应变法等。在本书第 6 章与第 9 章中,压气机轮盘和机匣定寿主要采用了这种方法。

对于发动机的高温、大载荷构件,在定寿研究中还应考虑疲劳与蠕变的交互作用,常用的方法有应变范围划分法、频率修正法等。在本书第 5 章与第 7 章中,涡轮转子叶片和涡轮盘定寿主要采用了这种方法。

1.2.3 损伤容限定寿

理论和试验表明,许多含裂纹构件仍能在规定载荷下继续工作到下一次检修。如果发现

构件出现裂纹,就不加区别地予以报废,这是很大的浪费。用疲劳定寿的构件,在工作中不一定安全,这是因为在构件中可能隐藏着漏检的缺陷或裂纹。在疲劳定寿中,通常按最差试件的疲劳试验结果确定使用寿命。例如轮盘低循环疲劳寿命是根据无缺陷构件在存活率为99.87% (-3σ) 下出现0.78mm长的表面裂纹的循环数确定的,这意味着在一批750个轮盘中,只要发现其中一个轮盘出现首条可测裂纹,则认为这批轮盘均到寿,虽然可能还有749个轮盘尚未出现裂纹。这种一刀切的定寿方法是保守的,存在很大的浪费。

为了既保证构件安全可靠,又能充分利用其固有寿命,对发动机断裂关键件引入了损伤容限定寿。损伤容限定寿要求构件出现首条裂纹后,仍能在原定载荷下工作到下一次检修,但在这段时间内,裂纹不应扩展到临界尺寸致使构件失效。为保证构件安全可靠使用,通常在裂纹扩展期间需进行无损检查。检查间隔当然不应大于裂纹扩展寿命,为了提高安全裕度,在裂纹扩展到失效前,应有多次检查。检查次数的选取,随国家而不同,在美国和法国为2~3次,在英国为3~4次,在我国为2~3次。如果检查间隔已确定为一个翻修期限,则可相应确定容许的裂纹尺寸 ($[a]$)。当构件的实测裂纹尺寸 $a < [a]$ 时,可以继续正常使用构件;否则,应将构件予以修理或报废。

损伤容限定寿有两个优点,首先是安全可靠性高。由于 $[a]$ 比构件的初始裂纹尺寸大,容易被检测出来,而且在裂纹扩展到失效前尚有2次以上检查机会,如第一次漏检,还允许在第二次检查时查出;其次是经济性好,因为同一批构件在工作中的裂纹扩展快慢不同,故扩展到 $[a]$ 值的寿命也不同,但都比按1.2.2确定的疲劳寿命长得多,有利于挖掘使用寿命的潜力。

WP6发动机涡轮盘榫槽底部及其他关键部位定寿均采用了这种方法。但损伤容限定寿方法应用于振动影响较大的构件时要特别慎重,因为振动影响较大的构件,其裂纹扩展通常较快。

1.3 “七五”以来主要零部件定寿的指导思想

以保证飞行安全性、战备完好性、任务成功性为目标,以WP7系列发动机为对象,以零部件定寿工作为基础,全面汇总研制、生产、修理、使用情况,通过综合分析、领先使用和长期试车考核,确定发动机的使用寿命,走出国产航空发动机定寿的路子。同时,针对影响寿命和可靠性的薄弱环节,采用结构、工艺、材料改进等技术手段,实现可靠性增长,延长发动机寿命,为发动机的科学维修提供依据。

“八五”至“九五”期间,以WP7系列发动机为重点,并兼顾其他型号的发动机,在选定基本机型的条件下,研究、确定该型号发动机主要零部件的技术寿命。在WP7系列发动机中,与基本机型不同的主要零部件也进行了定寿研究工作;对于不同型号发动机的相同零部件,可用基本样机的试验数据,进行必要的补充工作,并给出其寿命指标。

1.4 发动机定寿的要素和技术途径

1.4.1 航空发动机定寿五要素

(1) 定义定寿对象。分清是整机或是零部件;是关键件、重要件或是一般件;是断裂关

键件或是耐久性关键件；是关键部位或是一般部位等。

(2) 明确使用的条件。明确使用的飞行载荷谱、环境谱、试验载荷谱和标准载荷谱等。

(3) 规定到寿的判据。不同的构件有不同的故障模式，通常将构件出现裂纹故障作为到寿判据。例如在轮盘的低循环疲劳定寿中，美国定义出现 0.75mm 长的表面裂纹为到寿判据；俄罗斯则定义 1mm 长，我国也规定出现 0.78mm 长的表面裂纹为到寿判据。

(4) 定量表示出成活概率。例如，在确定轮盘的寿命时，美国按存活率为 99.87% 定义，俄罗斯则按 97.72% 定义，我国也按 99.87% 定义。

(5) 定义寿命及其单位。要分清技术寿命、使用寿命、经济寿命、安全寿命、总寿命等不同的概念（详细的定义见第 10 章）。常用的寿命单位有小时数、循环次数、日历时间等。

1.4.2 主要零部件定寿七步骤

(1) 应用故障模式、影响及危害性分析（FMECA 或 FMEA）确定发动机关键件、重要件（这些件统称为主要件）和一般件。

(2) 从调查典型飞行剖面着手，制定出飞行载荷谱、环境谱，然后形成标准载荷谱。

(3) 进行材料试验，对于疲劳定寿，应取得主要零部件材料在不同温度下的应力、应变寿命曲线。对于损伤容限定寿，则应取得材料的平面应变断裂韧性、疲劳裂纹扩展速率等曲线。要求既有均值曲线，还应有“最差”值（ -3σ ）曲线。

(4) 对主要零部件的不同关键部位进行应力分析。需要建立计算模型，提供准确的边界条件，利用最危险的载荷和环境，计算应力、弹性应变和塑性应变。既要计算总体应力，也要计算局部应力。

(5) 进行寿命预测。根据构件所用材料的力学特性，所受载荷和环境，按需要进行疲劳定寿或损伤容限定寿。

(6) 进行疲劳定寿试验。分为小尺寸模型试验和全尺寸构件试验两种，应将试验器预先标定，注意较准确地模拟环境条件和边界条件。

(7) 根据各关键部位预测的寿命和试验的寿命，确定各关键部位的安全寿命（ A_r ）。取其中的最小值为该零部件的预定安全循环寿命（ P_r ），然后分几个阶段给出推荐使用循环寿命（ S_r ）。例如在英国国防标准《航空燃气涡轮发动机通用规范》（DEF STAN 00-971）中建议：第一阶段，使 $S_{r1} = 0.5P_{r1}$ ；根据到寿零部件的抽样试验和对其他件的检查结果，宣布第二阶段寿命，使 $S_{r2} = 0.75P_{r2}$ ；依此类推，可以宣布第三阶段寿命，使 $S_{r3} = P_{r3}$ 。以上均为以标准循环数计量的推荐使用寿命，最后用飞行换算率 β 确定各阶段的小时使用寿命 S ，使 $S_1 = S_{r1}/\beta$ ； $S_2 = S_{r2}/\beta$ ； $S_3 = S_{r3}/\beta$ 。

1.4.3 航空发动机整机定寿四步骤

(1) 发动机主要零部件定寿是整机定寿的基础，因此，首先必须确定主要零部件的寿命。通常根据发动机在研制、生产、使用及维修过程中暴露出的主要故障，结合国内外类似发动机的经验教训，确定发动机的薄弱环节，作为其寿命研究的重点。同时采用故障模式、影响及危害性分析方法、逻辑分析决断法或其他方法，对零部件进行分类，确定关键零部件、重要零部件和一般零部件，将薄弱环节的关键零部件和重要零部件优先列为寿命研究的重点。

(2) 通过对发动机整机的地面台架长期试车，给出发动机整机寿命的初始值。