

航空发动机转动部件的 失效与预防

FAILURE ANALYSIS AND PREVENTION
FOR ROTOR IN AERO-ENGINE

陶春虎 钟培道 王仁智 聂景旭 编著



国防工业出版社

航空发动机转动部件的失效与预防

Failure Analysis and Prevention for Rotor in Aero-engine

陶春虎 钟培道
王仁智 聂景旭



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机转动部件的失效与预防/陶春虎等编著.
北京:国防工业出版社,2000.1

ISBN 7-118-02146-6

I. 航… II. 陶… III. 航空发动机-转动机构-失效分析 IV. V232

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 46441 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 12¼ 310 千字

2000 年 1 月第 1 版 2000 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:22.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 崔士义

委 员 (以姓氏笔划为序)

于景元 王小谟 尤子平 冯允成

刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

序 言

发动机是所有航空装备的“心脏”。对飞机而言,发动机决定着其飞行速度、机动性、航程、有效载重、可靠性、经济性和环境适应能力。高推重比涡扇发动机的推广应用使得战斗机的巡航速度、机动性和作战半径大大提高;转向喷管的使用使得具有垂直/短距离起落、高机动性能的战斗机成为可能。大涵道比涡扇发动机的出现,使大型宽机身客机的燃油消耗比早期喷气客机减少了40%,大大提高了经济效益。同时,从成熟的航空发动机改型而来的地面燃气轮机具有结构简单、重量轻、启动快、可靠性高、维修方便、无需冷却水以及对燃料适应性强等优点,广泛作为民用发电、机械驱动、舰船推进和坦克等地面装备的动力。

航空发动机的设计与制造是多学科交叉、多部门参与、综合性极强的复杂系统工程,是当今尖端的、难度大的高科技技术的综合体现,是使用要求与条件最为严格与苛刻的动力装置。航空发动机在研制、生产与使用过程中,存在着各种各样的复杂问题和许多尚未为人们所认识的影响因素,出现各种不同程度的失效是难以避免的。认真分析研究这些失效事件,查明原因,总结经验,吸取教训,采取相应措施与对策,是提高发动机可靠性的有效途径。

现代航空装备尤其是军用战斗机,由机械故障导致的重大事故中大多数与发动机有关。在我国航空发动机以往所发生的各类重大机械断裂失效事件中,转动部件的断裂失效高达80%以上,其中主要是转子系统中的叶片、盘、轴及轴承以及传动系统中的齿轮等。

本书系统地论述了航空发动机及直升机的减速器齿轮等转动部件的主要功能、工作条件、失效特征、失效模式、失效机制和诊断

技术,同时介绍了具有实用性、新颖性的分析思路和疲劳断口定量分析技术,并对提高发动机及直升机的减速器齿轮等转动部件可靠性的主要技术措施作了介绍。这不仅有助于提高失效分析人员的诊断技术和分析判断能力,而且也为从事发动机设计、制造、材料研制以及使用、维修人员提供指导和帮助。本书是一本对航空装备转动部件的失效和预防应用价值很强的好书。

本书的作者及主审均是在航空界长期从事失效分析与预防研究的专家教授,他们总结了近年来航空发动机及直升机的减速器齿轮等转动件重大案例的失效事件经验和教训,汇集了他们近年来的科研成果和国内外同行的先进科学技术。

该书学术思想新颖,内容具体实用。中国科学院颜鸣皋和高镇同两位院士对该书给予了很高的评价。我们衷心感谢本书作者、主审人员以及为本书出版和我国航空发动机工业发展作出贡献的科技工作者们;衷心感谢国防科技图书出版基金对本书出版给予的资助。愿本书的出版对提高我国航空发动机转动件的设计制造、维修技术及管理水平,提高我国航空发动机的使用可靠性起到积极的推动作用。

吴大观

前 言

发动机是飞机的“心脏”，而“心脏”得以正常运行的关键“器官”则是发动机的转动部件，即转子系统中的叶片、盘、轴、轴承以及传动系统中的齿轮等。考虑到近年来直升机传动系统中齿轮故障较多，对飞行安全威胁很大，且属于转动部件，本书涉及直升机传动装置中齿轮的失效与预防。近年来我国航空发动机所发生的重大机械故障中，转动件的失效高达80%以上。本书系统地论述了航空发动机转动部件的工作特点、主要失效模式、失效机制及失效诊断技术，介绍了具有实用性、新颖性的分析思路和疲劳断口定量分析技术，并对提高发动机及直升机的减速器齿轮等转动部件失效抗力的主要技术措施作了分析与探讨。

本书共分七章。第一章重点介绍现代燃气涡轮发动机的结构特征、转动部件失效的教训与启迪、转动部件失效分析的任务和目标以及转动部件最常见的疲劳断裂失效，并介绍了并行工程在航空发动机转动部件失效分析中的应用。第二至第六章分别介绍了叶片、盘件、轴、轴承与齿轮等重要转动件的结构特征、受力状态，典型失效模式与机制以及失效分析思路与诊断技术方面的最新研究成果，并对提高发动机及直升机的减速器齿轮等转动件失效抗力的新的实用理论与方法进行了分析与探讨。第七章介绍了疲劳断口定量分析在失效分析中的应用。

本书第一至第三章由中国航空工业总公司失效分析中心钟培道研究员执笔，第五章由陶春虎研究员与谢明立工程师共同执笔，其余各章由陶春虎研究员执笔。全书由陶春虎统稿，并经北京航空材料研究院王仁智研究员和北京航空航天大学聂景旭教授审定。

本书是集体智慧的结晶,凝聚着我国发动机研制、生产、维修及失效分析科技人员的心血。1995年12月,在成都召开的中国航空工业总公司失效分析人员资格鉴定委员会会议上,作者曾就本书的初步设想、框架、构思及基本内容和与会的近20名专家进行了切磋和讨论,受益匪浅。书中的许多珍贵资料和照片也是由各航空工厂、研究所、院校所提供。在本书成稿过程中,得到了吴学仁、周利珊、张栋、刘庆臻、宋兆泓、钟群鹏等专家教授的支持与帮助。习年生、张焱、闫海、赵爱国、陈琳等为本书做了许多工作,付出了辛勤的劳动,并提供了许多照片。我国著名发动机专家吴大观先生对全书内容进行了审阅,为本书作序,并对一些内容提出了具体的修改意见。中国科学院颜鸣皋和高镇同两位院士对本书给予了很高的评价。国防科技图书出版基金评审委员会的专家们对本书内容给予了充分肯定,并诚恳地提出了修改意见。作者向为本书出版作出贡献的所有科技工作者致以衷心的感谢。

由于作者水平有限,本书的缺点错误在所难免,恳请读者提出批评指正。愿本书的出版能对我国航空发动机转动部件的设计、制造和维修技术及管理水平的提高起到积极的推动作用。

作者

1999年3月

目 录

第一章 概论	1
1.1 航空燃气涡轮发动机简介	1
1.1.1 涡轮喷气发动机	1
1.1.2 涡轮风扇发动机	3
1.1.3 涡轮螺旋桨发动机	5
1.1.4 涡轮轴发动机	5
1.2 航空发动机转动部件的失效与启迪	6
1.2.1 失效分析	7
1.2.2 设计	8
1.2.3 制造工程	11
1.2.4 失效分析组织管理	12
1.3 发动机转动部件失效分析的内容、目标与思路	14
1.3.1 失效分析的基本内容	14
1.3.2 失效分析的主要目标	15
1.3.3 失效分析的思路	17
1.4 航空发动机转动部件的疲劳断裂失效	18
1.4.1 疲劳断口的基本特征	18
1.4.2 疲劳断裂原因分析	23
1.4.3 零件疲劳寿命的估算	27
参考文献	28
第二章 压气机与涡轮转子叶片的失效和预防	29
2.1 转子叶片的功能及结构特点	29
2.1.1 压气机转子叶片	29
2.1.2 涡轮转子叶片	32
2.2 转子叶片的工作条件与受力分析	35
2.2.1 转子叶片的工作条件	35

2.2.2 受力分析	36
2.3 转子叶片的振动类型及其特征	40
2.3.1 转子叶片的振动分类与基本振型	40
2.3.2 尾流激振	43
2.3.3 颤振	44
2.3.4 旋转失速和随机激振	46
2.4 叶片失效的主要模式	46
2.4.1 叶片的低周疲劳断裂失效	47
2.4.2 压气机转子叶片的颤振疲劳断裂失效	53
2.4.3 叶片扭转共振疲劳断裂失效	55
2.4.4 转子叶片的弯曲振动疲劳断裂失效	58
2.4.5 转子叶片的高温疲劳与热损伤疲劳断裂失效	62
2.4.6 转子叶片的微动损伤疲劳断裂失效	69
2.4.7 叶片腐蚀损伤疲劳断裂失效	74
2.4.8 叶片榫头部位失效的基本模式	83
2.5 叶片失效的分析思路与诊断技术	89
2.6 影响叶片抗力的主要因素	96
2.7 预防叶片失效的主要技术措施	98
参考文献	101
第三章 压气机盘与涡轮盘的失效与预防	102
3.1 压气机盘与涡轮盘的结构特征	102
3.2 轮盘的承载及载荷谱	104
3.2.1 轮盘承受的载荷	104
3.2.2 轮盘的载荷谱	109
3.2.3 驻留时间	111
3.2.4 载荷谱对轮盘关键部位寿命和强度的影响	112
3.3 轮盘的振动	115
3.3.1 轮盘的振动形式	115
3.3.2 轮盘的自振频率及影响因素	117
3.3.3 引起轮盘振动的激振力	119
3.3.4 轮盘的行波振动	120
3.4 轮盘的失效模式	123

3.4.1 轮盘的弹性变形失效	123
3.4.2 轮盘的塑性变形失效	124
3.4.3 轮盘的低周疲劳断裂失效	128
3.4.4 涡轮盘榫槽槽底的应力腐蚀开裂	131
3.4.5 轮盘榫齿断裂失效	138
3.4.6 涡轮盘外缘封严篦齿裂纹	146
3.4.7 轮盘的振动疲劳断裂	147
3.5 预防轮盘失效的技术措施	157
3.5.1 设计	157
3.5.2 合理地选取轮盘材料	158
3.5.3 严格控制加工制造质量	159
3.5.4 对轮盘的关键部位尽量采取喷丸强化措施	159
3.5.5 使用	163
参考文献	164
第四章 轴的失效及其预防	165
4.1 轴的结构特点及工作条件	165
4.2 轴的受力分析	166
4.3 轴失效的基本类型及其特征	175
4.3.1 轴的疲劳失效	175
4.3.2 轴件的磨损失效	179
4.3.3 轴件的腐蚀损伤	184
4.3.4 轴件的变形	186
4.3.5 轴件的韧、脆性断裂	187
4.4 轴件失效的分析思路	187
4.4.1 力学参数分析	188
4.4.2 失效轴件的装配和服役条件分析	192
4.4.3 失效轴件的特征和断口的宏微观分析	193
4.4.4 失效轴件的材质及断口的微观特征分析	193
4.4.5 轴件失效原因的综合分析	195
4.5 预防轴件失效的主要技术措施	197
参考文献	204
第五章 轴承的失效	205

5.1 滚动轴承的结构特点及分类	206
5.1.1 滚动轴承的基本结构	206
5.1.2 滚动轴承的分类	206
5.1.3 轴承材料	208
5.2 滚动轴承的受力分析和工作条件	210
5.2.1 轴承的受力分析	210
5.2.2 轴承的工作条件	212
5.2.3 轴承的额定性能	214
5.3 滚动轴承失效的基本模式及其影响因素	215
5.3.1 滚动接触疲劳	217
5.3.2 开裂和断裂	224
5.3.3 旋转爬行	231
5.3.4 金属粘着	231
5.3.5 轴承的磨损失效	233
5.3.6 塑性变形失效	234
5.3.7 微动磨损	237
5.3.8 腐蚀失效	241
5.3.9 高速轻载打滑	242
5.4 轴承失效的分析与判断	244
5.4.1 轴承的失效及其主要特征	245
5.4.2 失效轴承的检验与分析	245
5.4.3 滚动轴承的痕迹分析	250
5.5 轴承的动态监控和铁谱分析技术	258
5.6 提高轴承使用可靠性的技术措施	261
参考文献	263
第六章 齿轮的失效分析	264
6.1 齿轮的类型与工作环境	265
6.1.1 齿轮的分类	265
6.1.2 齿轮的工作环境	267
6.2 齿轮的受力分析	271
6.3 齿轮的振动	276
6.4 齿轮失效的基本模式	289

6.4.1 齿轮的疲劳	290
6.4.2 表面磨损失效	309
6.4.3 齿轮的冲击过载失效	312
6.5 预防齿轮失效的技术措施	315
6.5.1 材料及热加工工艺	316
6.5.2 热处理工艺及表面完整性	318
6.5.3 结构及装配对齿轮失效的影响	322
6.5.4 润滑条件	324
6.6 齿轮失效的分析判断	324
6.6.1 齿轮失效现场信息	324
6.6.2 失效齿轮损伤的感官和痕迹分析	325
6.6.3 齿轮损伤的物理参数分析	329
6.6.4 齿轮材料的材质与冶金质量分析	330
6.6.5 裂纹和断口的特征分析	332
6.7 齿轮故障的动态监控和预防	334
参考文献	335
第七章 疲劳断口定量分析在发动机转动部件	
失效分析中的应用	337
7.1 疲劳条带间距的测定方法	337
7.1.1 实体光学显微镜	338
7.1.2 扫描电子显微镜	338
7.1.3 透射电子显微镜复型	339
7.2 断口反推疲劳裂纹扩展寿命的基本方法	340
7.3 断口反推疲劳原始质量	349
7.4 疲劳断口反推失效构件的应力	354
7.4.1 利用疲劳裂纹扩展长度及瞬断区来推算疲劳应力	355
7.4.2 利用疲劳条带间距确定失效件的疲劳应力	357
7.5 疲劳断口反推技术的其它应用	361
7.5.1 断裂先后顺序判断	361
7.5.2 疲劳断裂性质的辅助判断	364
7.6 疲劳断口定量分析存在的一些问题	366
参考文献	368

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Basic understanding of gas turbine aero-engine	1
1.1.1 Turbine jet	1
1.1.2 Turbine fan-jet	3
1.1.3 Turboprop jet	5
1.1.4 Turbo-shaft jet	5
1.2 Enlightenment from failure of aero-engine rotor	6
1.2.1 Failure analysis	7
1.2.2 Design	8
1.2.3 Manufacture	11
1.2.4 Organization and manage for failure analysis	12
1.3 Basic content, purpose and thinking of failure analysis for aero-engine rotor	14
1.3.1 Basic content	14
1.3.2 Purpose of failure analysis	15
1.3.3 Train of thought for failure analysis	17
1.4 Fatigue failure of aero-engine rotor	18
1.4.1 Analysis on characteristics of fatigue fractography	18
1.4.2 Analysis on cause of fatigue fracture	23
1.4.3 Approach to fatigue life	27
References	28
Chapter 2 Failure and Prevention for Compressor Vane and Turbine Blade	29
2.1 Function and structure characteristic of blade	29
2.1.1 Compressor vane	29

2.1.2 Turbine blade	32
2.2 Service conditions and basic applied stress analysis of blade	35
2.2.1 Service condition of blade	35
2.2.2 Stress analysis	36
2.3 Blade vibration and its characteristics	40
2.3.1 Basic classification and mode of vibration	40
2.3.2 Vibration agitated by tail gas	43
2.3.3 Trembling vibration	44
2.3.4 Rotating stall and random vibration	46
2.4 Basic modes of blade failure	46
2.4.1 Low cycle fatigue fracture	47
2.4.2 Trembling vibration fatigue fracture for compressor vane	53
2.4.3 Reversal resonance fatigue fracture	55
2.4.4 Bending vibration fatigue fracture	58
2.4.5 High temperature fatigue and thermal fatigue fracture	62
2.4.6 Fretting fatigue fracture	69
2.4.7 Corrosion fatigue fracture	74
2.4.8 Basic failure modes of blade serration	83
2.5 Train of thought and diagnosis technique in blade failure analysis	89
2.6 Principal factors for blade resistance to failure	96
2.7 Basic prevention measures for blade failure	98
References	101

Chapter 3 Failure and Prevention for Compressor and

Turbine Discs	102
3.1 Structural Characteristics of compressor and turbine discs	102
3.2 Applied loading and loading spectrum on disc	104
3.2.1 Load on disc	104