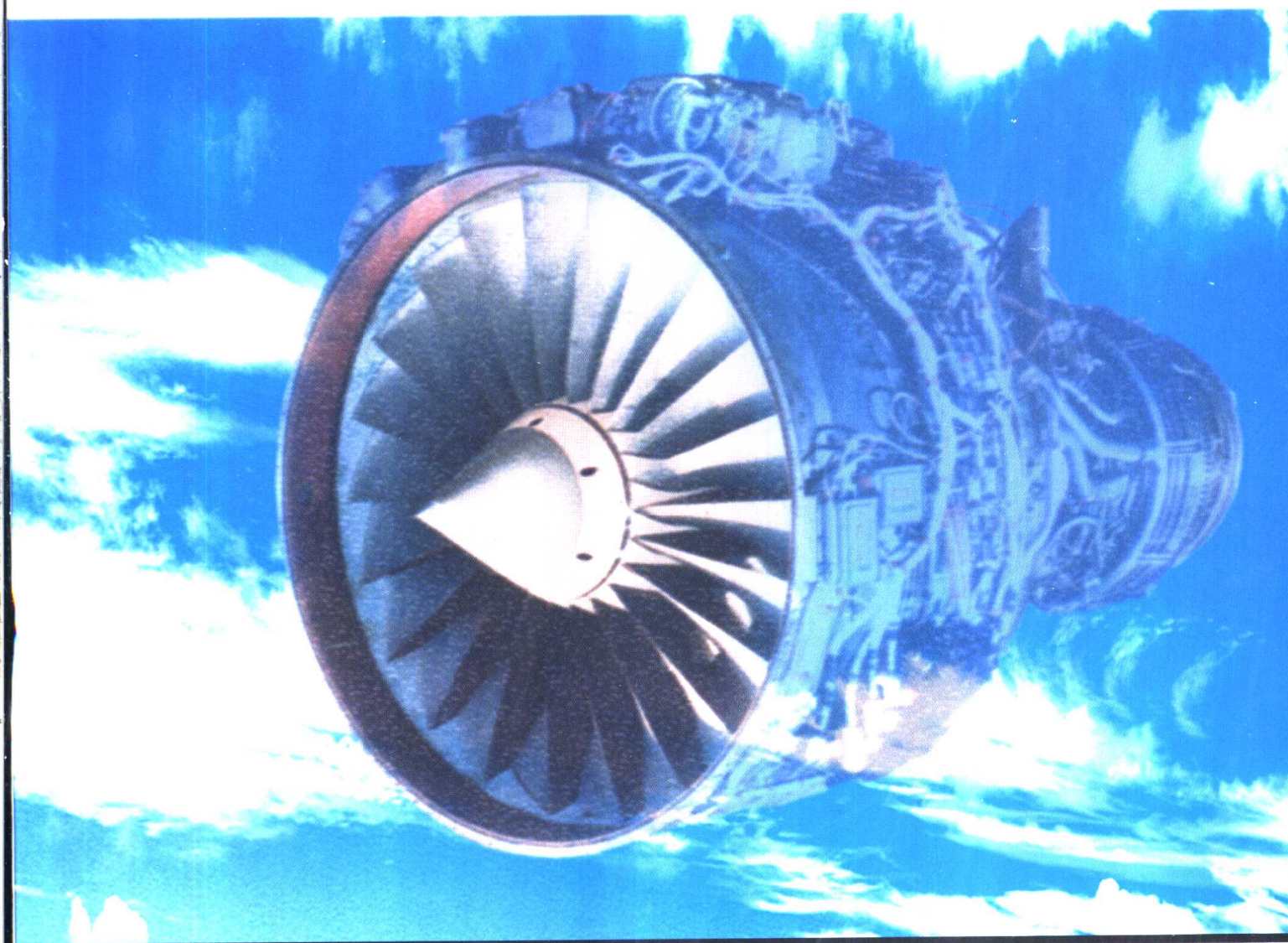


航空发动机可靠性 与故障抑制工程

宋兆泓 著



北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>

航空发动机可靠性 与故障抑制工程

宋兆泓 著



北京航空航天大学出版社

56459101

内容简介

本书分成两大部分,即航空发动机可靠性工程和故障抑制技术。全书共5章:第1章介绍可靠性工程;第2章介绍寿命与寿命评估方法;第3章阐述故障规律与特征;第4章为典型故障分析;第5章研究叶片结构故障与颤振。每一章包含若干分题,但属同一类论题。每一问题有故障现象,有理论分析,有计算,有试验,有结论。问题来源于生产、飞行实际,经过研究和分析,将正确的结论再返回生产、飞行实际,体现了理论与实际相结合的原则。

本书可供航空发动机工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机可靠性与故障抑制工程/宋兆泓著. —北京:北京航空航天大学出版社,2002.10

ISBN 7-81077-213-9

I. 航… II. 宋… III. ①航空发动机—可靠性—研究②航空发动机—故障诊断③航空发动机—故障修复
IV. V263.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 050337 号

航空发动机可靠性与故障抑制工程

宋兆泓 著

责任编辑 陶金福

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083),发行部电话:82317024

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail:pressell@public.bj.chinfo.net

北京宏文印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:8 字数:205 千字

2002 年 10 月第 1 版 2002 年 10 月第 1 次印刷 印数:1000 册

ISBN 7-81077-213-9/V·009 定价:16.00 元



简 历

宋兆泓,男,教授,辽宁省昌图县,1931年生。

1955年北京航空学院发动机设计专业毕业,1958年北京航空学院发动机振动专业硕士研究生肄业。自1958年到1991年以至退休后,都在北京航空航天大学405教研室任教。曾从事于航空发动机振动、叶轮机械叶片流体诱发振动和发动机可靠性研究等教学与科研工作。曾与著名教授周盛先生共同获得“航空发动机叶片颤振研究”1992年国家科学技术进步二等奖;“叶轮叶片流体诱发振动研究”1987年全国高等学校科技进步一等奖;还有航空部部级奖五项。

个人专著和主篇的有获1994年“中国图书”奖的《航空发动机典型故障分析》;1988年出版的《航空发动机强度设计》;主编的有《航空发动机可靠性工程》、《航空发动机寿命研究》等。

曾任北京工程学会理事、北京航空航天大学学会理事兼动力专业委员会主任、原航空部、空装部两部可靠性专家委员会委员并任民方组组长。

序 一

质量是航空发动机第一生命线,而可靠性是保证发动机质量的重要手段。可靠性系统工程在我国的实施起于20世纪60年代,到90年代初航空工业得到迅速发展。但是从行业的总体上来看,航空发动机研制生产中的可靠性和维修性工作都起步较晚,现在的工作仍处于初步阶段,与其他行业和航空领域内的飞机与机载设备相比,还有一定的距离,亟待在新世纪里加速前进。同时,在这方面既有理论水平又有多年经验累积和具有使用价值的文献,甚感需要。

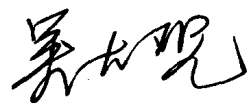
北京航空航天大学宋兆泓教授,从事可靠性和故障分析研究,积数十年科研教学经验,结合企业生产科研和外场使用情况,发现问题,进行深入调查研究,把外场出现的故障,组织同行专家教授,开展研究专题,进行航空发动机产品质量的提高和定寿,故障排除,写出有理论水平和使用价值的论文和专家建议,深受领导的好评和奖励。

宋兆泓教授已退休十年,但仍忙于航空发动机的教学与科研工作;在他今年养病的日子,继续将他的数十年工作的宝贵经验资料,整理成文,准备出版,这种热爱祖国航空事业的精神,值得我们崇敬和学习。

根据作者提供的资料,全书共分为两部分:一为可靠性工程和寿命评估,二为故障分析和叶片颤振,共5章、23节。书中内容是作者积累十余年可靠性研究工作的经验总结,有几篇是作者抱病奋力编写完成的。在寿命评估中有WJ-5发动机涡轮叶片的试验定寿。该项试验确定的叶片寿命值,得到民航总局的认可和采纳,并获得航空部科技进步奖。还有WP-7发动机二级涡轮叶片试验定寿,考虑到叶片的蠕变效应问题,为国内首创,并达到国际先进水平。关于叶片颤振,虽然只纳入了一篇综合性论述文章,但其内容较全,对航空发动机抑制叶片颤振工作具有工程应用价值,

该书除了可靠性与故障分析有高的理论水平和使用价值外,作者能结合广大群众的要求,在教学和写作中将可靠性、故障分析理论采用大众化语言,写得通俗易懂,颇受生产、科研和使用单位的广大科技人员和工人们的欢迎。因此,本书的出版,在新世纪里将推进航空发动机可靠性研究工作,对进一步提高航空发动机的质量必将产生重要作用。希望此书早日与读者见面。

航空工业第一集团公司 科技委



2002.10 于北京

序 二

由于航空发动机是高速高温燃烧气体在高负荷下工作的动力机械,如何保证它能够长时间可靠地工作是一个重要的关键。随着航空发动机在发展中功率、推力越来越大,因此在研制和生产中,可靠性和维修性就必须十分重视。

北京航空航天大学教授宋兆泓同志,十数年来致力于这方面的教学与科研工作,以他自己深厚的有关航空发动机构造与原理以及可靠性系统工程的基础知识,结合发动机厂、所生产科研和外场使用情况及出现的故障,组织同行专家进行深入研究,为发动机质量的提高和寿命的延长做出了贡献。

在十余年来,他所领导的集体完成了十多项有关科研课题,其成果博得好评,深受发动机界的重视。其中有关压气机叶片颤振研究,曾获国家教委科技一等奖和国家科技进步二等奖。

在此期间,由他主编出版的著作有1987年的《发动机寿命研究》,1989年的《发动机可靠性工程研究》,以及1994年获得国家级“中国图书”奖的《航空发动机典型故障分析》一书。这些著作成为有关领域中的重要文献。

除科研和著作外,宋兆泓和他的集体还作了大量的教学培训工作,曾为航空、航天和空军有关部门的厂、所组织“可靠性与寿命”讲座和培训班30余次,学员达1600人次。组织发动机厂、所领导“可靠性技术”宣讲班3次,推广“威布尔分布分析”技术讲座班10余次,以及组织航空发动机可靠性技术研讨会和交流会共10余次。

宋兆泓的上述工作在航空发动机界影响很大,对于我国航空发动机的可靠性研究和故障分析作出了贡献。可惜的是宋兆泓由于严重糖尿病导致失去左下肢,而不能继续承担重大的科研与教学工作;但他在养病期间仍能坚持将这些年来工作成果,整理成文出书,这是难能可贵的。

书中的内容理论联系实际,来源于生产、使用、维护,又用于生产、使用、维护,有较高的实用价值,对于航空发动机的设计、制造和维护修理工作的技术人员以及教学、研究工作者都有参考价值。

北京航空航天大学

曹传钧

2002年3月2日

前 言

我 1991 年退休已有 10 多年,依然奔波在教学和科研第一线上。历史的机遇,总是给那些有志于和眷恋工作的人以丰美和优厚的礼遇。20 世纪 90 年代,正值我国航空发动机行业大力开展可靠性工程研究的时候,又逢航空发动机出现一个多发性故障事件期。我有幸参与了有关活动与会议,接受了多项故障事件的排故任务和可靠性工程的研究课题。我和我的科研小组(含研究生),共同努力完成了各项工作,充实而又丰盛的内容,构成了我写这本书的客观基础。

“天有不测风云,人有旦夕祸福”,在世纪之交的最后几天,病魔夺去了我的左下肢。在我养病的日子,产生一种愿望,能否将这些可贵的资料,整理成文,面示于航空事业,存留于社会。在这种想法指使下,半年多来我奋力完成了这本书的编写。

本书是属于航空发动机可靠性工程范畴的,书中的每一章、节问题都是来自于生产实际,通过研究与分析又返回于生产,体现了理论与实践的相结合,体现了急军工生产之所急的特点。

本书的构成分为两大部分,航空发动机可靠性工程和故障抑制技术。全书共分为 5 章、23 小节,相当于 23 个分题。每一章属同一类论题;每一小节为一单元,独立阐述一个事件,而各单元之间有着一定的关联性。每一单元,有理论、计算或试验、分析和结论,都便于科研与生产单位参考和引用。这本书不同于一般教科书的格局。

第 1 章可靠性工程,共 5 节。本章属概括性论述,适合于发动机在新机设计及在役机种的延寿、改型或交付使用工作时,进行可靠性规划和编写验收报告时的需要,内容实用,为常规书籍中所没有。它是我十余年来从事可靠性工作的经验累积和总结。

第 2 章寿命与寿命评估,共 5 节。本章两种叶片低周疲劳试验定寿方法、发动机零件小子样寿命算法、整机可靠性寿命预评估方法等,都是科研与生产中发生的实际问题。其中 WJ-5 发动机涡轮叶片的试验定寿,在国内属于首次。该试验确定的叶片使用安全寿命值,得到原航空部和民航总局的认可与采纳,并获“航空部科技进步奖”。WP-7 二级涡轮叶片试验定寿,是空军装备部可靠办发动机“八五期间”的定寿项目。该课题考虑到叶片的高温蠕变效应影响,使试验结果

更接近实际,也是国内首创,达同类试验项目的世界先进水平。

第3章故障规律与特征,共3节。它综合论述了我国航空发动机40余年来,在研制、生产与使用过程中所发生的重大故障事件及其规律性;综合评述了叶片与轮盘两种零件的疲劳损伤故障规律与特征,反映了我国航空发动机总体故障现象的概貌,具有历史资料的性质,参考价值较高。

第4章典型故障分析,共5节。它阐述了四种叶片和一种轮盘故障机理与排故措施,都是发动机生产与使用中所发生过的重大故障问题。书中5个机种的故障和排故方法,虽然都属于疲劳损伤故障现象,但由于各自的故障特征不尽相同,分析则各有重点和各具特色。在故障分析中,既有理论分析,又有计算方法、试验方法、排故措施等,可作为厂、所排除同类故障的参考。

第5章叶片结构故障与颤振抑制,共5节。它与第4章中的几例叶片故障相衔接,但侧重于结构与故障改进措施方面,如压气机叶片前缘削角排故规律等,其结论与措施,都曾得到工厂的关注与采纳,用于生产,收效良好。书中论述的压气机叶片出现的双振型共振现象,是当前航空发动机中具有代表性的科研课题。

叶片颤振抑制技术,是当今航空发动机发展中的热门与尖端性科研课题,我在这个科研领域中,已有近20余年的研究历史,获得一定成果。本书受篇幅所限,仅纳入1项叶片颤振综合性的论述内容和航空发动机叶片颤振与抑制技术。概述了叶片颤振预估计算法、叶型设计与抑颤、错频技术与抑颤和复合材料抑颤特性等。还简述了“颤振转子”的试验问题,应用性较强,对发动机的预研设计和生产排故,直接有用。在叶片颤振研究中,我与著名学者——周盛教授曾共同获得过“高教部科技进步一等奖”和“国家科技进步二等奖”。

我深望本书的出版,能为我国航空发动机工业在开展可靠性工程和发动机排故工作中,提供一些有实用价值的参考信息。在新世纪之初,作为一个普通教育工作者,尽到自己的一点微薄力量和贡献。同时,本书作为向2002年10月25日,母校——北京航空航天大学50周年校庆的一份献礼。

本书在编写过程中,曾得到北航405教研室老师们的帮助与鼓励,得到得意弟子王延荣教授、博士的技术性校正与帮助,集聚了20年来所带过的各位硕士生、博士生的智慧与劳动成果;得到两校(北京四中与北航)校友,陆航局郭允良研高工的热情支持,得到我国航空界二位老前辈吴大观教授和曹传钧教授的指点与推荐,也得到了在生活困难时家人的亲情鼓励与帮助。在此一并表示衷心感谢。

本书可作为从事航空发动机行业的专家、技术人员、工人和在校研究生的参考书籍和专业读物。由于时间仓促,作者水平所限,本书的错误和不足之处,望读者指正。

作者 宋兆泓

2002.2.1 于北航

目 录

第 1 章 可靠性工程

- 1.1 航空发动机可靠性工程三个主要方面 1
- 1.2 可靠性设计工程十大相关性图 5
- 1.3 可靠性“三纲”内涵 10
- 1.4 可靠性分配(预计)计算专家评分法 18
- 1.5 发动机平均故障间隔时间 MTBF 的数值分布算法 22

第 2 章 寿命与寿命评估

- 2.1 叶片高温低周疲劳寿命试验确定法
——WJ-5A1 发动机一级涡轮叶片定寿 30
- 2.2 计入疲劳/蠕变时涡轮叶片高温低周寿命试验确定法
——WP-7 发动机 II 级涡轮叶片定寿 35
- 2.3 叶片低周疲劳寿命与高周影响效应的相关性 39
- 2.4 涡轮盘小子样低周疲劳寿命计算
——威伯斯—先验评估法(Webayes M) 43
- 2.5 航空发动机可靠性预评估论证
—— $MTBF \leq 160$ h 可安全运行的可行性评估 46

第 3 章 故障规律与特征

- 3.1 航空发动机重大故障事例与特征 50
- 3.2 叶片振动疲劳断裂故障的特征与规律性 56
- 3.3 轮盘疲劳破裂故障的机理与规律性 62

第 4 章 典型零件故障分析

- 4.1 叶片共振相干与限频排故方法
——WP-6 发动机二级涡轮叶片疲劳断裂故障 67
- 4.2 涡轮叶片叶冠搭接故障
——WP-7 发动机一级涡轮叶片故障分析 72
- 4.3 涡轮叶片榫齿断裂故障
——WP-8D 发动机一级涡轮叶片故障 78

4.4	压气机叶片边角掉块故障现象	
	——WP-13F1 型发动机压气机二级转子叶片边角掉块故障	84
4.5	压气机盘盘/叶耦合行波振动	
	——WP-7 发动机压气机四级盘周边断裂故障分析	93

第 5 章 叶片结构故障与颤振

5.1	非均匀分布支板的激振力谐波分析	
	——压气机导向器 5 个加厚叶片的激振力分析	97
5.2	压气机叶片叶尖削角调频排故研究	101
5.3	叶片双振型共振现象	104
5.4	叶片振动可靠性设计评估方法	106
5.5	叶片颤振抑制技术	110

第 1 章 可靠性工程

1.1 航空发动机可靠性工程三个主要方面

1.1.1 概 述

可靠性工作是保证航空发动机质量的重要方法与手段。质量是产品的第一生命线,没有优秀的质量将没有一切。可靠性工作是一项系统工程,由多方面的工作所构成。保证与提高产品可靠性的过程,也就是与产品故障作斗争的过程。可靠性是研究产品在全寿命期间可安全工作的方法与措施。可靠性工程的特点在于它具有鲜明的随机性和概率性。

可靠性工作说起来很简单,做起来则很繁杂,但从总体上看,可分为三大系统工程:

- (1) 产品质量管理与控制系统工程;
- (2) 可靠性“软件”系统工程;
- (3) 可靠性“硬件”系统工程。

我国航空发动机可靠性工作的开展已历经十余载,虽有一定起色,成果也可观;但总的来看,发展不够平衡,资金少,力量单薄,有时还得不到足够的重视,产品故障层出。据近 40 年来对 10 余种在役军机机种约 160 余起故障事件的统计:20 世纪 60~80 年代期间,发动机所发生的一等、二等的等级故障事件,其故障率约为 $\lambda=0.3$ 次/年,即平均每 3 年发生 1 次。然而进入 90 年代后,故障频次增高,其 $\lambda=(0.5\sim1.0)$ 次/年,即平均每 2 年或平均每 1 年发生 1 次。问题是相当严重的,由此可见开展可靠性工作是十分迫切和必要的。

现对这三方面的系统工程作一简要介绍。

1.1.2 产品质量管理与控制系统工程

一个优质的产品,是通过精心设计、先进工艺和严格管理而生产出来的。管理与控制工程是提高产品质量的根本保证。

产品质量管理和控制系统工程,就是要建立全厂(企业)性质的,对产品进行先进的、科学的和近代化的控制网络系统,以保证产品的正常运行和优质生产。也就是说,要建立以厂长(或总工程师)为中心的产品质量管理与控制网络系统。

以厂长(总师)为中心的产品质量管理与控制网络系统,大体上分 4~5 个层次。

第一层次(最高层次)是厂长(总师)控制网络终端,随时了解和掌握全厂产品的生产、质量和运作情况,并可及时下达指令。

第二层次为各设计室、工艺室、理化室、分厂和关键件工艺车间等的网络中间站,反映与上

报各主要生产环节的生产情况,可以监控到产品关键件的关键工序的工艺现况等。

第三层次为网络的基层环节,可监控毛胚件、原材料、各种附属件、外购件和相关附件的储备、质量和供应等问题与状况。

第四层次为网络中间环节或终点环节,可监控产品最终质检、销售、质量信息反馈等环节。此层次应包括产品外厂使用信息、信息反馈网络、信息库和质量监控系统等。

产品质量管理与控制网络系统,不应是一个简单的计算机控制的生产网络系统,而应适应于国际上推行的国际质量标准 ISO—9000 系列的要求,并与之相接轨。产品都要通过 ISO 的检验认证,取得认证后,产品才能投向市场和走向世界。正如民用飞机和发动机一样,都要通过国际民航《适航标准和规范》的认证。中国为中国民航适航标准《CAAC33 部或 35 部“取得”适航证》以后,才能投入航线通行于世界。

国际质量标准 ISO—9000 系统,自颁布以来世界上许多国家接受了这一系列标准,特别是工业部门和行业部门也越来越多地采用了这一系列标准。美国国防部(DDA)对此标准及其使用效果进行综合评价后,决定采用这一系列标准;美国宇航局(NASA)也认可了这一标准;美国联邦航空局(FAA)也处于决策阶段。目前国外民用航空器的设计与验收,虽然还是沿用适航条例标准,但欧洲的民用航空器已采用了两种标准。

目前我国民用发动机采用了《适航条例标准》验收发动机,而军用发动机则没有一个统一标准进行验收。

国内外许多企业与工厂都建立了全企业的质量管理与控制网络系统。然而,这项系统工程,对于航空发动机行业来说,单靠搞发动机可靠性工作的人员,将难以完成。还必须依靠或委托搞企业管理的专业人员,配以可靠性工作人员,共同来承担这项任务。

目前,我国航空发动机企业和工厂,在发动机产品质量的管理上,虽然也有一套完整、严格的生产制度和规范,但都达不到新时代的先进的要求,还没有一家工厂在一个机种上建立这样的管理与控制网络系统。

要从根本上保证产品的质量,就要早下决心建立这样的质量管理与控制网络系统。

1.1.3 可靠性“软件”系统工程

可靠性“软件”系统,指的是为贯彻和实现可靠性工作所要执行的有关文件、标准和规范等,以及为可靠性工作服务的有关软件包、软件库和相关程序等。关于可靠性标准和规范,属于由国家专门机构制定和颁布的,本文不论及。

这里所提及的可靠性“软件”系统工程,主要包括两大部分:

第一部分是可靠性所要撰写的文件和报告以及标准和规范等;

第二部分是与可靠性有关的信息、文件和技术的软件库(包)等。

1.1.3.1 可靠性主要文件或报告

航空发动机在新机研制、仿机定型、仿机国产化以及在役机种中有较大的改进、改型时,国家都要求该产品在交付使用验收时,提供必要的与可靠性有关的文件及报告,其内容大体有如下所列的主要项目。这些报告,格式虽相类似,但内容将随“机”而异。

1. 主要项目名称

(1) 产品可靠性“三纲”报告:

A. 产品可靠性(保证)大纲报告;

B. 产品维修性(保证)大纲报告(以可靠性为中心的预防维修性大纲);

C. 产品后勤保障性大纲报告。

注:有时还要给出产品质量控制与保证大纲报告。

(2) 可靠性建模分析报告。

(3) 可靠性分配(预计)分析报告,含发动机系统结构与可靠性功能层次相关框图。

(4) 整机系统 FMECA 的分析报告。

(5) 关键件或特定事件的故障树(FTA)计算与分析报告。

(6) 确定关键件与重要件及其验证标准的报告。

(7) 整机系统的 FRACAS 分析报告。

(8) 产品可靠性评估报告:

A. 产品可靠性预评估报告(产品在研制初期);

B. 产品可靠性总评估报告(产品在研制终结时期)。

(9) 产品在寿命期间的风险预估与分析报告。

(10) 产品在寿命期间可靠性增长试验工作(技术与管理)报告。

目前,在我国不论新机还是在役的几个机种,都曾应上级的要求,编写过“可靠性大纲”、“FMECA”和“FTA”等少数文件,但较全套的则没有。据所知,当前只有某工厂应海军领导的要求,在某机产品国产化进程中,已编写和提供了较全的有关发动机可靠性方面的文件与报告约 10 余件,创我国航空发动机的首例。

1.1.3.2 与可靠性有关的信息、文件和技术的软件库(包)

当前比较成熟或已成为商品的软件库(包)有:

(1) 发动机外场使用状况跟踪记载数据库;

(2) 发动机 FMECA 表格自动生成与记载软件包;

(3) 发动机 FRACAS 表格自动生成与记载软件包;

(4) 失效树(FTA)自动生成与计算软件包;

(5) 数据处理与分析技术软件包,如商用程序——威布尔-史密兹(Weibull SMITH)计算软件;

(6) 蒙特、卡洛(MONTE、CARLO)仿真技术(寿命分析与风险预估)商用计算软件包;

(7) 维修性分析软件包;

(8) 结构可靠性分析软件包;

(9) 可靠性信息网络工作软件包;

(10) 产品质量技术与管理软件包。

上述部分软件可自行编制,也可购买商品件。

1.1.4 可靠性“硬件”系统工程

可靠性“硬件”系统工程中的工作极为广泛,如定寿、延寿、可靠性试验、可靠性增长和发动机各式的强度工作及试车试验工作等。它没有一个明确的规范说明其应含有的内容。其实在发动机设计、研制与生产过程中,所贯彻和执行的有关“结构完整性”要求、民航《适航条例》要求等,都属于可靠性“硬件”系统工程范畴。

这里我从两个侧面介绍一下可靠性“硬件”系统工程中所遇到的一些问题。

1.1.4.1 几项机理与规律

(1) 整机可靠性建筑在单元体(部件)或关键件可靠性的基础上。

(2) 整机的使用寿命取决于单元体(部件)或关键件的使用寿命。

(3) 对于单元体可更换的发动机,发动机将没有整机的总寿命,只有各单元体的更换期时数或更换使用寿命。

(4) 发动机零部件的寿命,有以零部件“定时”截尾所确定的使用技术寿命,这时的寿命不是零部件的固有寿命;有以零部件“断裂”截尾所确定的使用安全寿命,这时的寿命就是零部件的固有寿命。

(5) 发动机零部件的共振高周疲劳断裂(HCF)故障,属于特定状态下发生的故障,应予排故处理,而不属于寿命问题。

(6) 零部件的低周疲劳寿命(LCF: L),是现代发动机的主要定寿内容。低周LC是指发动机每工作一个起降时,为一循环周次 N 。构成零部件的低周疲劳寿命至少要具备两个条件:

其一是零件的寿命截面(最薄弱部位)受载荷下的最大应力 $\sigma_{\max}$ 要接近于零件材料的 $\sigma_{0.2}$ 值;

其二是零件要承受一定的低周循环次数 N 。

目前发动机中的零件,如涡轮叶片、轮盘、轴以及机匣等的定寿,就是定的这个低周疲劳寿命。

零部件的低周疲劳寿命的确定,是以地面上的在试验器上进行的试验方法为主;理论计算定寿为辅,因为计算法往往确定的是零件的中值寿命。零件定寿也可以采用真零件的发动机台架试车“挂片”试验法。

(7) 确定零件低周疲劳寿命时,高温蠕变效应会使零件的使用安全寿命有所降低。高温蠕变也会给零件带来“应力松弛”现象。

(8) 确定零件低周疲劳寿命,在计入零件的高周影响效应时,都会使零件的寿命降低。但是,欲加高周效应是在严格的条件下进行的,而不能随意加上,尤其是转子的工作叶片。

(9) 压气机转子(除掉叶片本身)是可以进行低周疲劳定寿的。通常冷部件转子的LCF寿命,为热部件转子LCF寿命的2倍。

(10) 压气机叶片定寿是一项非常复杂的课题,由于叶片本身的强度安全裕度较大(4~6),不能用低周疲劳的概念与方法去定寿。压气机叶片所出现的多种疲劳损伤现象,大多数是高周HCF共振疲劳或低周LCF颤振疲劳故障,皆属于工程上的排故问题。在一般情况下压气机叶片属于无限寿命设计的零件,在发动机全寿命期间,叶片不会因到寿损坏或“退役”。在进行压气机叶片定寿时,首先要摸清压气机叶片在发动机全工况范围内的共振特性。

(11) 到目前为止,国产现役机种的零部件还没有采用可靠性概率设计的,即没有采用强度干涉理论设计的。因此,零件就不可能在设计的同时给出其固有寿命,而是像现在这样采用实验等方法去测定其固有寿命。

(12) 在采用试验或统计方法确定关键件或重要件的使用安全寿命时,国外通常沿用了两种标准和方法。

A. 以广义威布尔分布分析(Weibull A)为基础,确定产品带有置信度 γ 、存活率(可靠度) R 的寿命值 L 。如美国GE公司和PW公司所常用的,取 $\gamma=85\%\sim 95\%$, $R=99.9$ 。允许零件的不可靠值为 $F=1/1000$,通常记做 $B_{0.1}$ 。它的含义是,每1000个零件中,不允许有1个零件报废或到寿,相当于正态分布中的一 3.09σ 设计标准。也就是说,同批1000个零件中,只

要有1个零件报废,则其余999个零件一齐报废,可见其要求相当苛刻。其安全性较大,风险性较小,但不经济。

B. 以正态分布分析为基础。此法以英国 R. R 公司为主,前苏联和我国普遍沿用,通常取 $\gamma=85\%\sim 95\%$, $R=99.87$,为 -3σ 设计标准。它的不可靠值为 $F=1/741$ 。它的含义是在741个零件中,只允许有1件报废,可见其安全性减小,风险度要增大。

1.1.4.2 可靠性中的寿命问题

(1) 定寿与固有寿命。零部件的固有寿命,是从零件设计、制造到投入使用时,就已经确定下来的固有特性,定寿就是要确定或找出这个固有特性,即固有寿命。

然而,当零件投入使用后,所确定的寿命为零件的使用寿命。严格说,使用寿命并不等于固有寿命,因为使用寿命受多种外界的影响,反映了不同环境下的真实寿命值,且随不同外界环境有所改变。这可以称为是固有寿命的再确定。

目前,对于在役机种已使用过的零件进行定寿,就是确定这种使用寿命值。严格地说,零部件只有用断裂截尾所确定的寿命,才为使用寿命中的固有寿命。

(2) 延寿。在零件定寿的基础上,对零件进行可靠性增长工作,使固有寿命有所增长,称为延寿。延寿也是对零件固有寿命的挖潜和寿命的延长,即固有寿命的再确定。

延寿不适用于所有的零件和机种。延寿件或机种,必须具备有延寿的潜力和可能;延寿是要对延寿件和机种进行一定的改进、改型工作,进行一定的可靠性增长工作才行。

发动机延寿了,并不等于发动机可靠性也随之增长了,因此,对延寿后的零件或发动机,还要进行必要的可靠性方面的考核工作。

(3) 可靠性增长。它是对原有产品进行“改进、改型、排故”等工作,使发动机的可靠性或寿命有所增长。但是应注意,改进得当,可靠性或寿命有所增长;改进不当,可靠性或寿命反而会降低。因此,可靠性增长工作,其结果可正、可负。

(4) 应注意,发动机性能的提高,其结果往往使发动机结构的可靠性有所降低。例如,提高涡轮前的温度等,以提高发动机的推力的方法。

(5) 发动机150 h耐久性试车的由来考查。对于活塞式航空发动机,150 h耐久性试车有其理论依据,它是按发动机强度考核标准来确定的,严格来说是按零件与整机的疲劳强度理论标准来确定的。

活塞式航空发动机的主轴转速,通常是 $n=2\,400\text{ r/min}$,150 h的疲劳数 $N=150\text{ h}\times 60\text{ min/h}\times 2\,400\text{ r/min}=2.16\times 10^7$ 循环次。按疲劳强度理论认为零件 $N>10^7$ 循环次,则该零件可过到“动强度”安全,即为无限寿命设计,可耐久安全地工作。

然而,涡轮喷气式发动机,因发动机主转子转速过高, $n=4\,000\sim 30\,000\text{ r/min}$,虽然也沿用了这一传统概念,认定以150 h为标准耐久性试车,但其循环次数 N 远远超过了 10^7 循环次数,显然试车时间150 h过长,或者过于安全。

1.2 可靠性设计工程十大相关性图

发动机主体有如人体,有躯干、四肢,如图1.1所示。

(1) 发动机主体如躯干。

(2) 控制技术如头脑。

(3) 两个先行工程,如两支臂膀。

- 预研工程:技术先行,技术储备,先进技术。
- 信息工程:先进信息,技术输导,经验与技术累积。

(4) 两个基础工程,如两支腿脚。

- 材料工程:结构设计,强度计算,试验研究。
- 载荷谱工程:结构设计,强度计算,试验研究。

发动机设计要求相关图,如图 1.2 所示。

(1) 早期设计:追求性能。

(2) 现代设计:适应性+可靠性+维修性;

售后服务,全周期经济性。

发动机三大系统工程相关图,如图 1.3 所示。

(1) 可靠性质量管理控制系统工程:建立以厂长(总设计师)为中心的质量管理系统控制网络。

(2) 可靠性“软件”系统工程:

- 第一部分 可靠性所要撰写的文件和报告以及标准和规范等;
- 第二部分 与可靠性有关的信息、文件和技术的软件库(包)等。

(3) 可靠性“硬件”系统工程:设计、试验、试车、制造工艺等。

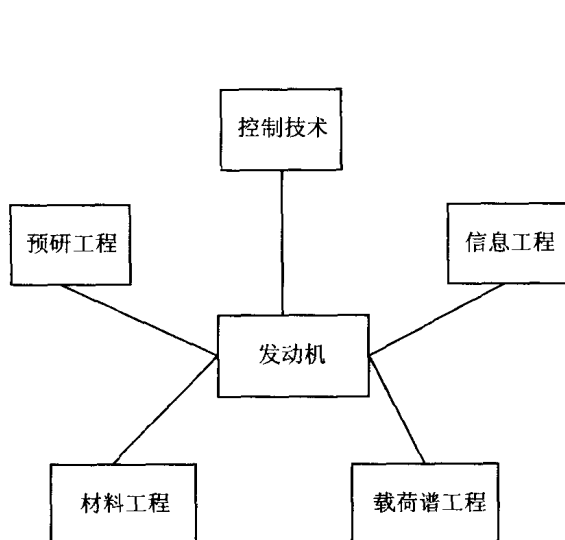


图 1.1 发动机主体工程相关图

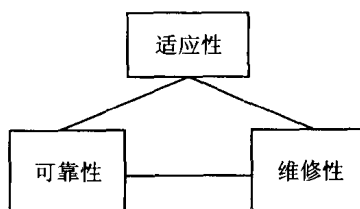


图 1.2 发动机设计要求相关图

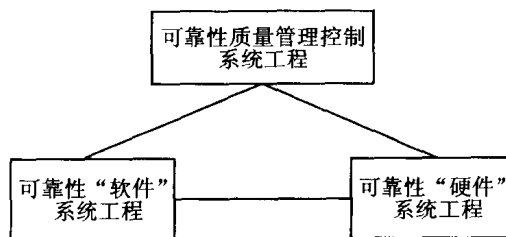


图 1.3 发动机三大系统工程相关图

发动机十大系统工程相关图,如图 1.4 所示。

- (1) 指标、标准、规范:纲领性,规范性,总体要求。
- (2) 可靠性设计工程:主体工程,设计制造,试验定型,固有寿命。
- (3) 可靠性使用工程:产品运行全过程,故障分析,寿命评估,可靠性增长,使用寿命,固有寿命的再确定。
- (4) 系统可靠性工程:可靠性建模、预估、分配,优化设计,关键件。

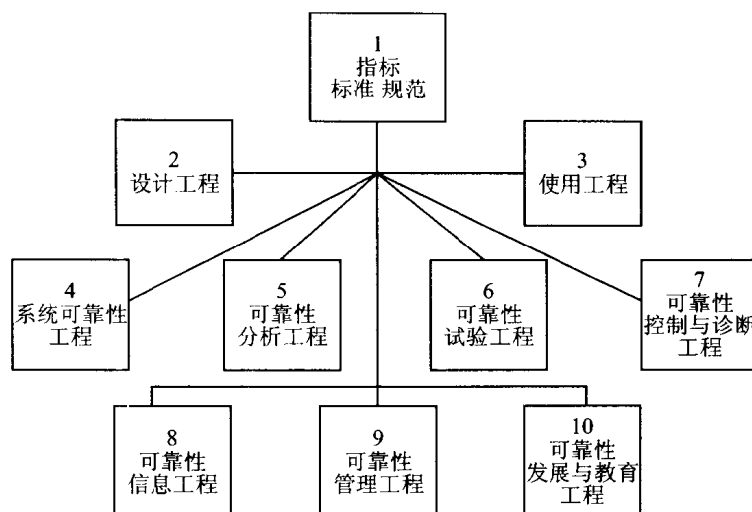


图 1.4 发动机十大系统工程相关图

(5) 可靠性分析工程: 数据处理, 寿命评估, 故障分析, 故障模式——FTA FMEA FMECA FRCAS。

(6) 可靠性试验工程: 配合设计, 强度试验, 环境试验, 寿命试验, 各类试车试验, 可靠性增长试验。

(7) 可靠性控制和诊断工程: 状态监控, 报警, 故障预测, 故障诊断。

(8) 可靠性信息工程: 数据收集、处理、分析、存贮, 信息反馈, 信息网络, 信息站, 信息中心。

(9) 可靠性管理工程: 管理系统, 管理网络, 管理控制中心。

(10) 可靠性发展与教育工程: 预研, 理论发展, 人才培养、储备, 后继教育。

发动机设计阶段控制相关图, 如图 1.5 所示。

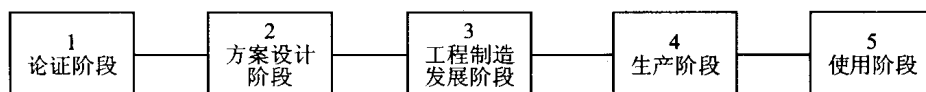


图 1.5 发动机设计阶段控制相关图

(1) 论证阶段: 提出发动机综合技术指标, 确保战备完整性、寿命周期费用经济性、整机可靠性, 维修性参数与指标达到预定要求; 预计可利用的维修人力和保证资源, 给出定购方可自外选购的产品以及可靠性与维修性系统的指标分配。

(2) 方案设计阶段: 确定可靠性与维修性的总体参数与指标, 给出参数与指标各阶段的目标值和门限值、技术门限值和使用门限值; 确定使用环境和任务剖面, 编制质量管理控制保证大纲、可靠性保证大纲、维修性保证大纲和后勤保障性大纲。

(3) 工程制造发展阶段: 设计监督, 设计评审, 研制与试验, 故障判别与验证, 产品鉴定与验收试验。

(4) 生产阶段: 审查质量控制, 推行减少质量波动方法, 制定与执行确保产品生产质量的有关文件与措施。

(5) 使用阶段: 组织实施使用试验与评估, 收集与反馈使用中产品的信息, 故障信息的收