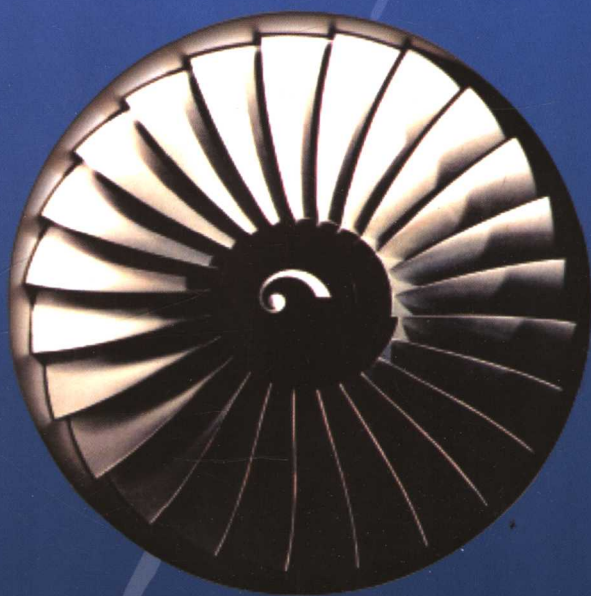


航空发动机结构设计分析

陈 光 著



北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是一本全面分析航空发动机结构设计的专著,内容涉及航空发动机结构设计的各个方面,包括:部件结构与总体结构、传动润滑、主轴承等的设计分析,发动机发展中的特种试验与使用中出现的重大故障,提高发动机可靠性、维修性的措施,排除故障的程序与方法,新型发动机中采用的某些新颖结构与加工方法等。本书还分别对国外现役与在研的先进军、民用航空发动机如 F100、F110、F404、EJ200、RB199、RD-93、F119 以及 CFM56、CF6、PW4000 系列、RB211 系列、遛达系列与 GE90 等的发展及结构设计特点进行了详尽的分析。本书不仅能为航空发动机厂所的广大技术人员及技术领导提供一手资料,也能给从事航空发动机材料、工艺研究工作的技术人员及飞机设计人员参考带来帮助。

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机结构设计分析/陈光著. — 北京:北京航空航天大学出版社, 2006.7

ISBN 7-81077-634-7

I. 航… II. 陈… III. 航空发动机—结构设计
IV. V23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 030340 号

航空发动机结构设计分析

陈 光 著

责任编辑 蔡 喆 鲍亚平

*

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:(010)82317024 传真:(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpresse@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:37.5 字数:960 千字

2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月第 1 次印刷 印数:2 500 册

ISBN 7-81077-634-7 定价:79.00 元

作者简介

陈光，男，1930年2月出生，中国共产党党员。1955年毕业于北京航空学院（北京航空航天大学前身）。现任北京航空航天大学教授；中国航空学会理事、中国航空学会科普工作委员会委员；北京航空航天大学学会常务理事兼秘书长。

长期从事航空发动机结构设计的教学、科研与生产工作，曾参与并负责某型航空发动机的研制任务；长期参与航空发动机生产、设计厂所型号生产、研制中的重大决策与故障分析等工作。在图-154客机发生的发动机四级低压涡轮非包容爆裂故障分析工作中获得部级科技成果奖。主编《航空燃气涡轮发动机结构设计》教材（获教委颁发的全国优秀教材一等奖）、《航空发动机设计手册》第三册“可靠性与维修性”以及“中国现代科学技术全书”的《航空宇航推进理论与技术》等。在国内专业刊物上发表过有关航空发动机结构设计分析专文几十篇。



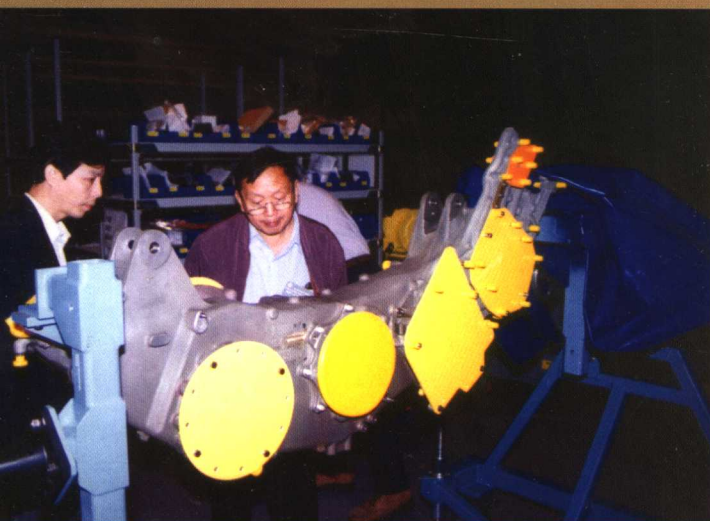
↑ 在美国西雅图波音公司航空博物馆“协和号”超声速客机前



↑ 在美国战略空军司令部展览馆高空无人驾驶侦察机前



↑ 在美国西雅图波音公司航空博物馆莱特兄弟飞机模型前

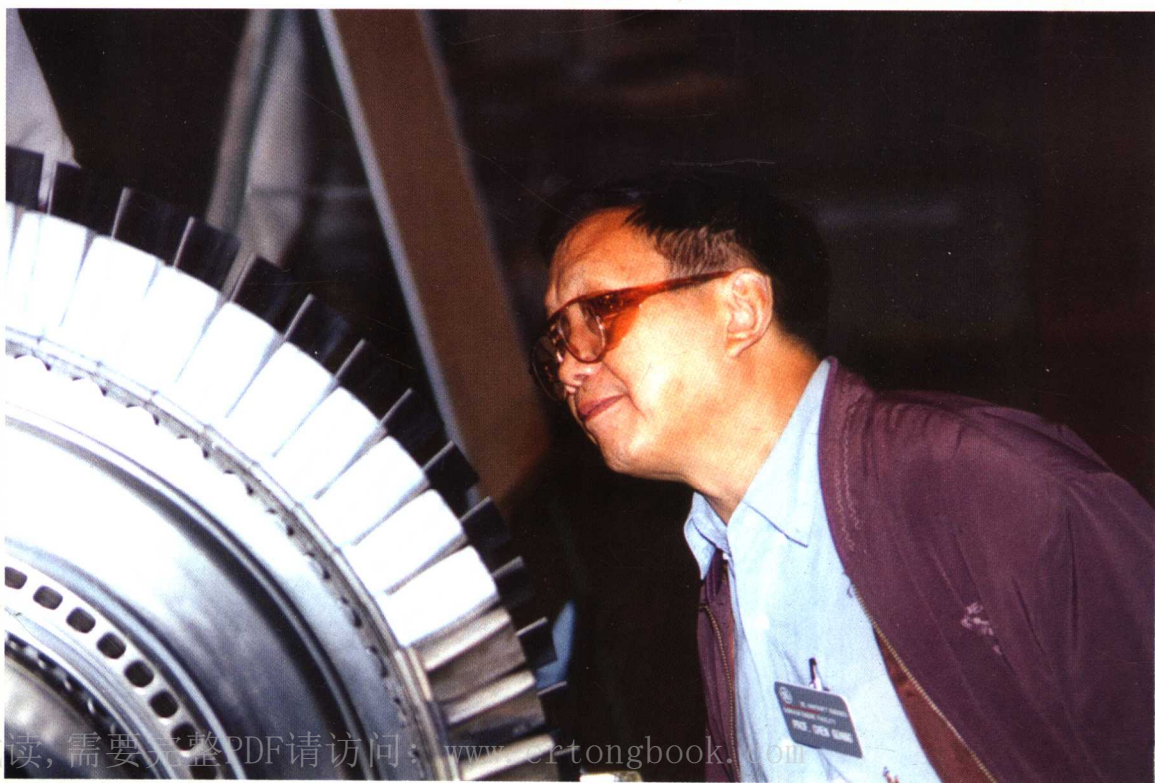


↑ 在美国 GE 公司参观 GE90 发动机的附件传动机匣

↓ 在美国 GE 公司参观 GE90 发动机的高压涡轮部件



↓ 在美国 GE 公司参观 GE90 发动机的高压涡轮转子



序一

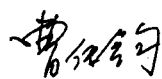
航空事业发展到今天这样高的水平,关键在于先进的飞行器和它强有力的“心脏”——航空发动机。航空发动机是一个复杂的机械,其工作条件十分恶劣:航空发动机工作温度高,内部各处的温度不同,且不断变化;要承受高转速以及各种环境和机动飞行给发动机带来的各种影响;还要求在质量和体积受严格限制的前提下产生强大的功率(或推力);要长时间可靠地工作;其性能还要能灵活精确地调节控制等等。因此,航空发动机特别是高性能的航空发动机的研制是一项非常复杂的系统工程。即使投入大量人力、物力,精心设计,制造精益求精,研制出的发动机仍不可避免地会在试验中出现各种故障,甚至还会在使用若干年后出现重大故障。例如,用于 F-15、F-16 先进战斗机的 F100、F110 高性能发动机,在投入使用 20 余年后就出现了若干次重大故障。

在航空发动机研制过程中,结构设计是一个非常重要的环节,直接影响发动机能否正常工作,能否保证达到设计指标(性能、可靠性和耐久性等),能否少出或不出重大故障等。但是结构设计是一项非常复杂的系统工程,不仅需要有发动机性能、强度、振动、调节、制造工艺和材料等多方面的丰富知识,而且还要求有一定的工程实践经验,同时还要对世界上现有的成功或不成功的发动机结构以及曾经出现的故障事故有较深入的了解。从事航空发动机研制的工程技术人员很希望通过一些有关发动机结构设计、分析的专著,在发动机结构设计、排除故障中得到一些借鉴和帮助。但是,目前在国内外这方面的著作还很少。

陈光教授从事航空发动机结构设计的教学和科学研究工作已 50 年,曾担任航空发动机结构课程教学、指导课程设计、毕业设计及指导研究生等工作,授课内容丰富、深入浅出、生动活泼,深受学生欢迎。他还参加了型号设计工作及某型发动机试制试验工作。近十几年,他担任航空工业部门重点发动机型号研制的咨询顾问工作,多次参与军内外发动机故障分析,在航空发动机结构设计、分析专业上积累了丰富的知识与经验。他还一直关注美、英和俄(包括苏联)航空发动机的发展研制、结构设计、故障及故障排除方面的资料,并进行了认真的分析,除

及时将国外发动机最新情况反映到教学中以外,还积极撰写多篇专稿发表在国内航空专业期刊中。

现在,他根据过去撰写的 80 多篇专业论文,结合航空发动机结构设计领域当前的新进展进行了补充、改写,汇编成这本专著。我相信,本书的出版将填补我国专业图书中航空发动机结构设计、分析专著的空白,对于从事航空发动机研制、应用的科技人员和相关专业教师、学生都是很有帮助的。



2005 年 8 月

序二

人类创新发明的航空燃气涡轮发动机,经过了近 70 年的发展。航空发动机结构设计在航空发动机发展进程中是研制、使用的关键环节。研制经验证明,这项技术综合性很强,需要紧密结合研制、使用的实际。这就需从事发动机结构设计的人员,具有广博的航空发动机有关领域的知识,有较强的理论联系实际的能力,对国内外航空发动机出现过的重大故障有较全面地了解,并善于从中吸取经验教训,方能达到做好发动机结构设计工作要求的理论联系实际的设计能力。

本书作者北京航空航天大学陈光教授是在 50 年的教学、科研工作中成长起来的优秀教授。他除了在发动机结构设计教学、科研中孜孜不倦地工作外,多年来还广泛收集国内外有关军、民用发动机发展进程及研制中的经验教训,从发动机的零部件到结构总图,各类发动机可靠性、耐久性和维修性以及发动机的重大故障等资料,并进行深入分析研究,撰写了几十篇分析文章,为我国航空发动机结构设计、发展和使用以及发动机故障排故工作等,作出了突出的贡献,是航空发动机行业的知名专家。

陈光教授积数十年的教学经验,发表了 80 多篇论文专著,值此庆祝执教 50 周年之际,从中筛选并进行整理、改写,补充大量插图,经过十多个月的编写工作完成此书。通读此书后,我深受启发。此书与一般航空科技书籍及教科书确有不同之处。它是从航空发动机结构设计发展、演变历程中收集的大量有关资料总结编写而成,体现了航空发动机整机、零部件改进发展史,是发动机研制观点、程序转变的记录,也是有关提高发动机可靠性、耐久性与适应性所采取的措施的资料收集和较全面的分析。

本书深刻体现了航空发动机研制工作的艰巨性。书中内容能解答一些我们从事航空发动机结构设计中多年来困惑不解的疑难问题。例如,书中解答了我们在航空发动机结构设计科学技术上与西方航空大国有多大差距,为什么差距愈拉愈大的问题;解答了为什么我们在研制航空发动机时需要巨额资金投入预先研究、技术储备,以利在研制发动机零件和整机时减少故障问题;提出应结合我国国情,吸取国外

先进经验改进我们的研制方法和研制程序,提高发动机研制水平的观点;解答了我们的干线飞机发动机应如何发展的问题,提出“我国暂不宜急于全面开展干线客机发动机的设计研制发展工作”,应积极做好研制干线飞机发动机的技术准备;分析了国外研制发动机的指导思想上曾经出现偏差,使出厂的发动机在使用中出现大量故障,影响作战任务的原因;提出了“应全面、多方面考虑发动机的发展,不能走‘重性能、轻结构强度’或‘有气无力’的仅注视性能而忽视结构强度的发展道路”;解答了为什么最著名、实力最强的三家发动机公司(GE、普惠、罗·罗公司),有那样深厚的研制技术基础,丰富的研制经验,并做了大量的苛刻的考核模拟试验,他们出厂服役的发动机在投入使用若干年后,无论是军用还是民用,仍然出现令人吃惊的重大故障的问题;解答了我们发动机研制机构中怎样才能“培养出一支强大的年轻的结构设计专家队伍”的问题等等。

本书可供航空发动机结构设计科研、教学以及从事航空发动机结构设计的设计师们——特别是各级发动机研制、生产单位的领导干部和从事航空工业军、民飞机使用、维护的人员参考。我相信将会使他们获益匪浅。

本书的编著与出版,受到多方面的重视和支持。我作为参与祖国航空工业建设的一名老兵,对本书的出版深表庆贺,衷心希望本书早日面市,以飨读者,为新世纪航空工业的发展做出新的贡献。

吴大观

2005年9月

前 言

2005年9月15日是我从事航空教育事业50周年的纪念日子。回忆这半个世纪来,我所进行的工作,一直是围绕着航空发动机结构设计这一专业进行的。我曾指导本科学生航空发动机课程设计与毕业设计,为本科学生与研究生讲授航空发动机结构设计课程,指导硕士生进行有关航空发动机结构设计的专题研究等多项教学工作;20世纪60年代中期,在深入分析研究某型航空发动机的残骸基础上,与其他同志合作共同指导学生完成了该型发动机的反设计工作,完成了全部生产蓝图与生产技术文件;在“文革”停课闹“革命”期间,与少数教师、技术工人和十几位学生,对该型发动机的残骸进行修复与补充加工,组装了一台供试车用的发动机,并成功地进行了试车,100%地达到了原发动机的最大转速;随后在该型发动机国产化过程中,又进行了艰苦的排除故障过程,为该型发动机日后的定型与“上天”打下了基础。这近十年的发动机研制工作,充实了我对发动机研制工作的感性知识,为更好地完成航空发动机结构设计的教学与科研工作,以及发动机的排故工作打下了比较好的基础。从20世纪90年代初起,我作为原航空工业部组织的“发动机重点型号专家顾问组”专家,在10多年时间中,参与了我国两个重点大型发动机型号研制的咨询与顾问工作;进入21世纪后,又参与了直升机用新型涡轴发动机研制的咨询与顾问工作。在参与这三型发动机研制的咨询与顾问工作中,除了为这些发动机的研制与排故工作出谋划策外,也学习到了不少从书本上得不到的实际知识。

在教学、科研与生产工作过程中,我一直注意收集与航空发动机结构设计有关的资料与图纸,并进行较深入的分析,在此基础上,先后(主要是近20年)撰写了80余篇有关航空发动机结构设计的专文,发表专业性期刊上;另外还写过一些专门的结构分析文章。这些文章涉及到发动机结构设计的各个方面,结合实际,且拥有较多的结构图,在目前看来,仍具有一定参考价值。考虑到目前我国航空发动机行业中,尚缺少一支强大的结构设计方面的年轻专家队伍,我希望我写的这些文章,对于那些从事航空发动机研制工作以及其他方面的专业人员能有一定的帮助。因此,我想在我从教50周年之际,挑选部分尚有参考

价值的文章,补充一些新内容并予以修改、整理,编著出版一本航空发动机结构分析的专著。当我将这一想法与航空一集团公司发动机事业部和航空二集团公司发动机部的领导谈过后,他们一致表示支持并对这本书的出版抱有极大的期望,同时还为本书的编写出版工作在经费上给予了慷慨的支持。他们的大力支持,坚定了我编写出版这本书的决心。

在筛选了编入本书的文章内容后,我又逐篇进行了整理改写及补充插图等工作。此工作从2004年年底至2005年8月,历时近10个月。

本书中有关民用发动机的文章,其资料与图片多数是从三家著名航空发动机研制公司(普惠、GE与罗·罗公司)来华参展、技术报告与产品研发报告以及产品使用说明书等中获得的,军用发动机的资料及图片部分来自航展,更多的是来自《Aviation Week & Space Technology》等英文专业期刊。在这次整理改写过程中,又从网上获得不少资料,使所改写的文章,大部分能与与时俱进,反映了一些最新的发展进程。

为了使读者可以有选择地阅读自己感兴趣的文章,而不必从头起一篇篇地阅读下去,所以编入本书的文章,每篇均能比较完整地论述有关内容。因此,有些插图与部分论点,可能会在几篇文章中出现,尚祈读者谅解。

本书的出版,得到北京航空航天大学教务处、北京航空航天大学出版社的大力支持,还得到航空一集团公司发动机事业部、航空二集团发动机部以及贵州航空发动机研究所的支持,在此一并致以衷心的感谢!

我国航空发动机界的老前辈、著名的航空发动机老专家吴大观教授以及我的老师、著名的航宇动力专家、原北京航空航天大学校长曹传钧教授慨然为本书作序,使本书增色不少,在此表示衷心的感谢!

由于航空发动机结构涉及的专业面较广,又限于本人的水平,本书中肯定会有不足与错误之处,欢迎读者批评指正!

陈光

2006年5月

目 录

航空发动机结构设计综述

重视航空发动机结构设计的作用与地位	3
从国外几起严重故障谈航空发动机研制的艰巨性	8
第二次世界大战后航空发动机的飞速发展	13
干线客机发动机的发展与设计特点	19
支线客机发动机发展	26
为 AE100 提供的三种发动机结构设计比较	34
我国干线客机用发动机发展途径探讨	40
四种军用发动机发展试验程序的变化	46
访问苏联中央航空发动机研究院	50
助推发动机在民航客机上的应用	55

军用发动机

几种军用涡扇发动机的结构设计分析	63
EJ200 发动机的结构设计特点	69
从 F100 -PW -100 到 F119 -PW -100——回顾航空发动机研制观点的转变	75
F100 -PW -220 发动机——F100 -PW -100 发动机提高可靠性的改型	83
F110 -GE -129 EFE 的发展与设计特点	87
F119 发动机的发展与设计特点	94
RB199 发动机的发展与设计特点	102
F414 发动机设计与研制特点	110
RD -93 发动机结构设计特点分析	116

民用发动机

CFM56 系列发动机结构与研制特点	137
CF6 -80C2 发动机结构设计特点	195
PW4000 发动机设计特点	202
PW8000 高涵道比涡轮风扇发动机	210
遑达 600 发动机设计特点	215
遑达 500 发动机设计特点	221
遑达 700 发动机设计特点	225
用于 A380 的遑达 900 发动机	233
波音 777 及其所用发动机一些设计特点	238
GE90 发动机发展与设计特点	253
苏联的第三代民用涡轮风扇发动机	267
RB211 三转子涡轮风扇发动机	272
RB211 -535E4 发动机设计特点	285

主要零部件设计

航空发动机转子的典型结构和新结构	297
航空发动机叶片的典型结构和新结构	340
EJ200 高压压气机结构设计改进	381
整体叶盘在国外发动机中的应用分析	386
新型发动机零部件中的一些新结构	404
高压压气机钛着火的危害与防止措施	417
IMI 834 高温钛合金在压气机中的应用	422
GE 公司低转速研究用压气机与涡轮试验器	424
CF6-80C2 风扇的包容试验	427
鸟撞击与风扇叶片的设计	429
CFM56-3 发动机本机平衡技术	434
离心喷油式环形燃烧室	440

传动、滑油及其他系统

现代航空发动机滑油系统设计特点	447
新型发动机附件传动机构的设计特点	451
波音 757 发动机指示与机组报警系统	454
国外航空发动机滚动轴承的发展概况	459
航空发动机轴承滑蹭损伤与防止措施	474
离心式油滤	481

航空发动机的可靠性与维修性

提高航空发动机可靠性的措施	487
提高波音 777 飞机发动机可靠性的措施	515
提高 GE90 发动机维修性的主要措施	526
BR710 发动机提高可靠性和耐久性的试验	532
PW2000 发动机提高可靠性的措施	536
双发客机的延程飞行与发动机的可靠性	539
漫谈航空发动机的包容能力	542
人素工程在发动机维修性设计中的应用	546

航空发动机故障与故障分析

航空发动机故障分析	553
由发动机故障引起的 F-16 战斗机重大事故	558
Д-30KY-154 发动机低压涡轮转子爆裂故障	563
斯贝发动机滑油消耗量大引起的故障	568
F404 发动机使用 100 万小时后出现的两个故障	570
JT8D 发动机油腔着火造成涡轮轴折断故障	573
启动-发电机“放电”造成 PT6A 发动机空中停车	576
用于波音 777 的三型发动机出现的一些故障	580
RB211-22B 风扇转子飞行中的严重故障	585

航空发动机结构设计综述

重视航空发动机结构设计的 作用与地位

1 引言

航空发动机结构设计是航空发动机研制与使用中的一个重要环节。在结构设计领域中,没有很多、很专的高深的理论,也没有复杂繁琐的公式推导,一般也不需要编制有大量语句的计算机程序;但是,它却是一项综合性很强,要紧密结合实际的工作。在结构设计中,一般要综合考虑气动、性能、传热、材料、工艺、强度、振动、装配、使用和维修等诸方面的问题,还要考虑实际制造与使用的具体条件;并结合国内外航空发动机的使用经验,进行权衡,才能得到较好、较适用的设计。这就需要从事结构设计的技术人员有广博的航空发动机各有关领域的专业知识,有较强的理论联系实际的能力;并对航空发动机的生产、试车和外场使用情况有较全面的了解,对国内外航空发动机出现的重大故障包括故障现象、机理和排除措施等也有所了解;而且要随时掌握和关心国内外其他航空发动机的研制和使用动态,及时吸收人家的经验和教训,从而搞好航空发动机结构设计工作。

从国内外航空发动机的研制、使用和排故等经验来看,好的结构设计可在下列几方面起到显著的作用。

2 提高航空发动机的性能、可靠性和耐久性

航空发动机的研制技术到目前已达到极高的水平,在气动、性能和传热学等方面虽仍有潜力可待发掘,不过也很难取得较大突破;但是,在某些结构设计上做些改进,却能使部件和发动机的效率得到较大提高。

例如:在高压压气机机匣上,对应工作叶片叶尖处开斜槽,用以减少漏气损失的措施,既简单,效果又较好(能提高压气机效率约1%),自20世纪80年代初GE公司在CF6-80C2发动机上采用后,很快就在罗·罗公司的RB211-524G/H发动机、普惠公司的PW4000发动机上采用。

代替传统的篦齿封严装置的刷式封严装置于1989年在V2500发动机上投入使用,由于将非接触式封严方式改为接触式封严方式,封严效果明显提高;但由于当时未能解决在高温、高相对接触速度环境条件下的工作可靠性,因此并未得到推广。当发展了能工作于高温、高相对接触速度下的刷封后,将其用于波音777客机(1995年6月投入使用)的PW4084发动机高压压气机出口与卸荷腔间,大大减少了漏气损失,使发动机推力一下子提高了2%左右,相应的耗油率降低了约2%。另外,在高压涡轮1级工作叶片榫根与1级导叶间的封严也改用了刷封,使发动机性能进一步提高。由于在PW4084发动机上取得这么大的效果,普惠公司立刻在1996年,对用于波音747、波音767、MD-11和A300等客机上的PW4000系列发动机进行了同样的改装,以作为PW4000系列发动机提高性能计划中的主要措施之一。与此同时,

GE 公司也在其用于波音 777 客机的 GE90 发动机低压涡轮中,采用了三套刷式封严装置。目前,还在发展一种用于高压压气机后的气-气非接触式气膜封严装置,它也将获得较好的封严效果,能使发动机的推力提高 2.0%~2.5%。

一般,风扇叶片叶身与燕尾形榫头间的平台均做成平行四边形(当然榫头也做成平行四边形),用以包容叶身截面,这样平台在周长上做得较宽。为了在轮盘上能安装下所有的风扇叶片,轮盘轮缘直径只能做得较大,当然风扇的外径也就加大了。在 RB211-535E4 发动机中,将叶片榫根做成圆弧形,使其形状基本与叶身根部截面形状一致,使平台在周长上的宽度变窄,这样,在较小的轮盘轮缘直径下就能装下所有叶片,风扇的外径可以减小。显然,这一结构设计的改进,不仅能减轻发动机的重量^①,而且也对风扇叶片抗外来物击伤的能力有所提高。因此,这一设计已用于 V2500、遛达 700 和遛达 800 等发动机中。

为了解决大风扇叶片的振动问题与提高抗外来物击伤的能力,早期的大风扇叶片均在叶身距叶尖约 1/3 处做有中间突肩。这种突肩不仅增加叶片加工难度并带来强度问题,还会降低风扇的效率与喘振裕度。罗·罗公司设计并加工了一种宽弦、夹层(两面板间夹以蜂窝芯板)的无凸肩叶片,用于 1985 年投入使用的 RB211-535E4 发动机中,这种结构不仅很好地解决了振动与抗外来物击伤问题,扩大了喘振裕度,而且使风扇效率增加了约 4%,发动机巡航耗油率降低了 4.0%~4.6%。这种叶片装在 A320 飞机上的 V2500 发动机中,曾遭到重量为 5.66 kg、翼展 2.14 m 的巨鸟撞击而未折断,这证明他的确具有较强的抗外来物击伤能力。1990 年,罗·罗公司又对这种叶片做了进一步改进,发展了称为“超塑性成形/扩散连接”的钛合金夹芯叶片,其重量比原型降低了 15%,已用于遛达 700(用于 A330)和遛达 800(用于波音 777)上。用于波音 777 客机的三种发动机的风扇叶片中,除遛达 800 采用“超塑性成形扩散连接”的钛合金夹芯叶片外,GE90 发动机用复合材料制成,PW4084 发动机用钛合金壁板铣出槽道焊接成空心的。三种叶片的单位长度的重量遛达 800 发动机的最小,为 10.17 kg/m,GE90 和 PW4084 的分别为 11.917 kg/m 和 19.17kg/m,证明遛达 800 采用的风扇结构设计具有较好的效果。到了 20 世纪 90 年代,新研制的发动机已无例外都采用了宽弦风扇叶片。

风扇与压气机中的整体叶盘是一新发展的结构,它不仅能减少零件数与重量,其性能与可靠性也均有提高。自从发展了一套修理技术后,不仅在新研制的发动机中例如 F414(风扇 2、3 级,高压压气机 1~3 级)、F119(风扇与高压压气机中各 3 级)中采用外,对现役发动机进行改进时,也采用整体叶盘作为提高性能与耐久性的一种手段,例如 F100-PW-229 的延寿型 F100-PW-229A 中,将 2、3 级风扇改用整体叶盘;同样,在 F110-GE-129 的延寿型 F110-GE-129R 中,将 3 级风扇全部改为整体叶盘。

航空发动机转子止推支点处的滚珠轴承,受的负荷较滚棒轴承承受的要大很多,因为它除了承受径向负荷外,还要承受较大的轴向负荷。一般均要采用一些措施来提高它的可靠性,即使这样,它仍然是发动机中的薄弱环节。例如,CFM56-3 发动机在 1986 年 1 月至 1992 年 12 月的七年中,高压压气机前滚珠轴承(3 号轴承)失效占空中停车事件的 25%。为了提高转子止推支点滚珠轴承的可靠性与耐久性,在有的发动机例如 CF6-80C2、CFM56-5 和 GE90 中,在止推支点处采用滚珠、滚棒二轴承并列的方案,并在结构设计中确保滚珠轴承仅承受轴向负荷,径向负荷则由滚棒轴承承受,大大提高了滚珠轴承的可靠性与耐久性。

在级压比高的风扇中,气流通道由前向后收敛较大,因此叶片叶身底部做有向后上方倾斜

^① 本书中“重量”指质量,单位为 kg。