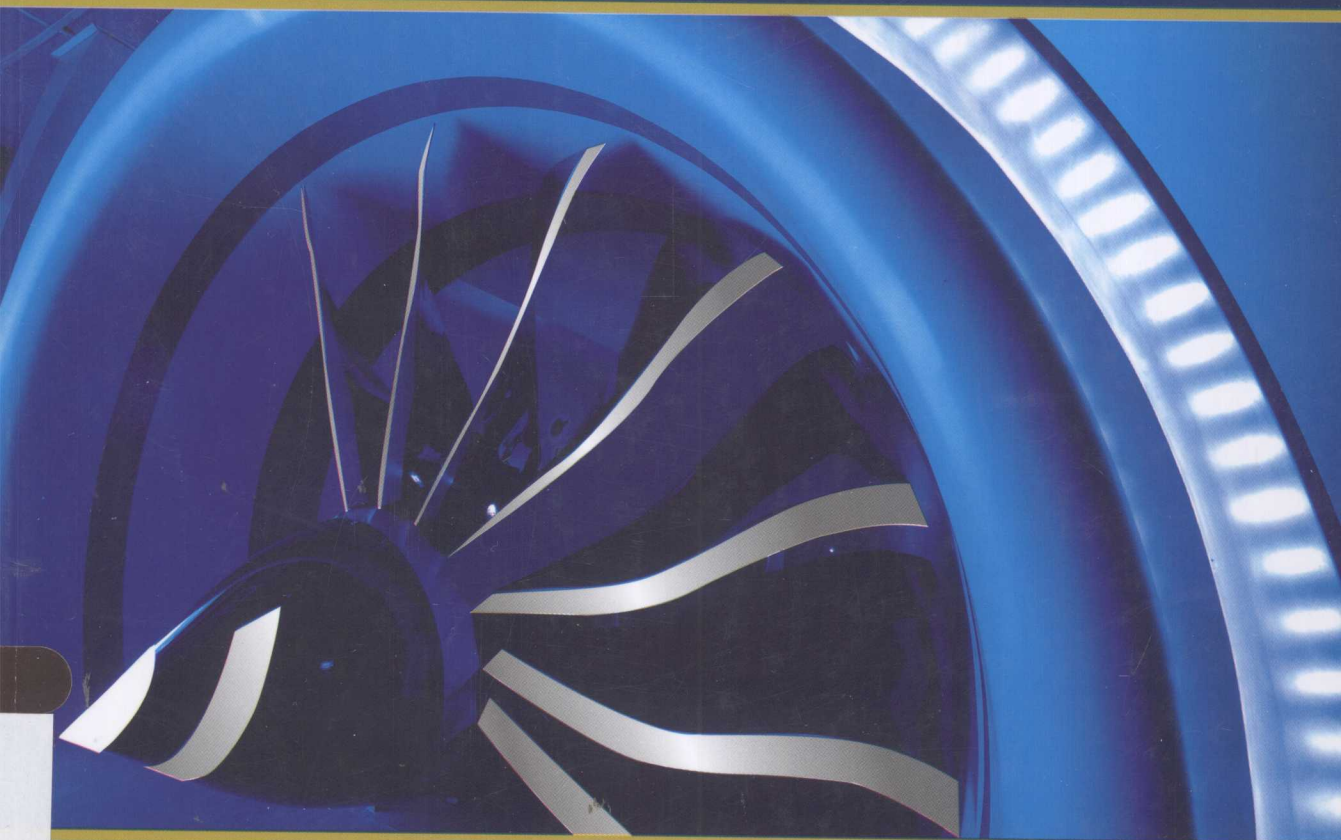


航空发动机 结构设计分析 (第2版)



陈 光 著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

014043515

V23
17-2

航空发动机结构设计分析

(第2版)

陈 光 著



北京航空航天大学出版社

V23
17-2

212830110

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、遑达系列、GE90、GEnx、PWL000G 与 LEAP 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. -- 2 版. -- 北

京: 北京航空航天大学出版社, 2014. 4

ISBN 978-7-5124-1203-3

I. ①航… II. ①陈… III. ①航空发动机—结构设计

IV. ①V23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 166077 号

版权所有,侵权必究。

航空发动机结构设计分析(第 2 版)

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(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316524

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:46 字数:1 207 千字

2014 年 4 月第 2 版 2014 年 4 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 7-5124-1203-3 定价:98.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024



► 陈光教授

陈 光 简 历

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）。北京航空航天大学教授；曾任中国航空学会理事、中国航空学会科普工作委员会委员；北京航空航天大学常务理事兼秘书长。享受国务院颁发的政府特殊津贴。

长期从事航空发动机结构设计的课程教学、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。主编并出版了《航空发动机结构》教科书（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 3 册“可靠性与维修性”部分、主编出版了“中国现代科学技术全书”的《航空宇航推进理论与技术》、编写出版了[世纪航空科技丛书]之《航空科学技术的发展》一书等。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百余篇。



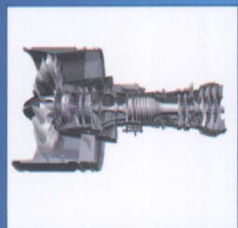
▶ 在美国西雅图波音公司航空博物馆莱特兄弟飞机模型前留影



▶ 在美国 AV-8B 垂直起降飞机前留影



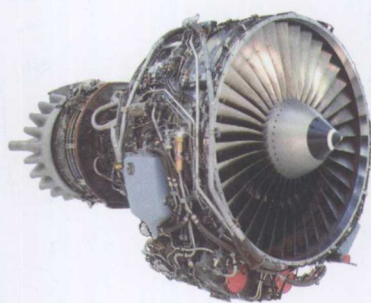
► 在波音公司展览馆陈列的前“空军 1 号”美国总统专机中的总统会议室留影



► 2012 年 9 月 26 日获得中国老教授协会颁发的《老教授科教工作优秀奖》



► 2008年4月在狼牙山为当地小学生作航空科普报告



Aircraft Engine



► 2008年5月1日在北京科协举办的《首都科学讲堂》上为公众作航空科普报告



► 在“第二届航空发动机研制中国国际论坛”上作专题报告



序一

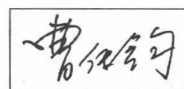
航空事业发展到今天这样高的水平,关键在于先进的飞行器和它强有力的“心脏”——航空发动机。航空发动机是一个复杂的机械,其工作条件十分恶劣:航空发动机工作温度高,内部各处的温度不同,且不断变化;要承受高转速以及各种环境和机动飞行给发动机带来的各种影响;还要求在质量和体积受严格限制的前提下产生强大的功率(或推力);要长时间可靠地工作;其性能还要能灵活精确地调节控制等等。因此,航空发动机特别是高性能的航空发动机的研制是一项非常复杂的系统工程。即使投入大量人力、物力,精心设计,制造精益求精,研制出的发动机仍不可避免地会在试验中出现各种故障,甚至还会在使用若干年后出现重大故障。例如,用于 F-15、F-16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

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。

A rectangular box containing a handwritten signature in black ink, which appears to read '曹会军' (Cao Huijun).

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。这就需要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除工作等,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工作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。

吴大琨

2005年9月

第2版前言

本书于2006年7月出版后,正像我的老师曹传钧教授在为本书写的序言中说的:“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”,受到了从事航空发动机研制、生产与使用部门的欢迎。时任中国航空工业第二集团公司总经理的张洪飏同志为本书的出版给我写了一封信,信中写道:

陈教授:

《航空发动机结构设计分析》一书收到,多谢惠赠!

先生从教半余世纪,传道授业,桃李芬芳;笔耕不辍,著可等身,令人敬仰。

航空发展,须动力先行。然而,较之飞机,在航空发动机方面我国与航空发达国家相比差距更大,形势更为严峻,故航空动力亟待实现跨越式发展。跨越式发展,我以为途径有三:其一,基础研究取得突破,带来产业上的革命;其二,不断改进,从量变到质变;其三,借力发展,通过对外合作实现“撑杆跳”。三者基础研究最为本质,最为关键。先生大作,汇集了教授思想精华,凝结了航空发动机改进发展史,解答了发动机结构设计若干疑难问题,对指导我国发动机基础研究和研制实践均大有裨益。请允许我作为一个老航空,对先生的工作表示感谢。



2006年9月14日

时任空军装备部部长的魏钢将军看完本书后,专门派参谋到北京航空航天大学找到我,说:魏部长从头到尾看完本书后,感觉这本书写得好,很有实用价值,对空军很有用,希望今后陈教授能参加空军有关发动机的专业会议等。

张洪飏总经理的信与魏钢部长的话,均说明本书在中国航空发动机研制、使用中能起到一定作用。很快,出版首印的2500册销售一空,不时有人找我想要买到此书,也只能空手而归。我曾在某研制单位看到设计人员由于买不到本书,而将本书复印后装订成厚厚一大本,时时翻阅的情况,感到不安。曾经有人向我提出能否重印本书,以满足读者要求的建议,我感到重印本书意义不大,是不可取的。因为航空发动机的发展可用“日新月异”来形容,如果我的书不能与时俱进,不能反映发动机发展的最新技术,那么出版它的意义就不大了。

在本书出版后的几年中,民用航空事业取得突飞猛进的发展,A380、B787、

B747-8 等满足 21 世纪“绿色航空”要求的新型客机先后投入航线使用,为这些飞机研制的遑达 900、遑达 1000 与 GEnx 等适应“绿色航空”要求的发动机。经过研制厂商大力开发,这些新型发动机已先后投入使用。为竞争中国大型客机 C919 发动机的市场,PW1000G 与 LEAP 中等推力的发动机先后启动了研制计划,且已被多种飞机选用。当代推力最大的发动机——GE90-115B 在风扇转子支承结构中,一改传统的设计,采用全新的布局方案,已被最新发展的发动机采用。遑达 900 在飞行中中压涡轮爆破,造成现代最豪华、最经济与最安全的 A380 飞机严重受损的事件,曾是 2010 年在航空界中最为轰动的事件。

在本书出版后的这些年中,我紧跟形势,先后撰写了近 20 余篇有关发动机发展的文章,反映了前面所述的一些新发动机的研制与设计特点,重大故障的分析等,基本做到了“与时俱进”。我想是否能选出一些文章增补到我原来出版的《航空发动机结构设计分析》一书中进行再版。2012 年底,我将我的想法与出版本书的北京航空航天大学出版社负责人进行了交流,他们认为值得再版。经我筛选后决定增加 17 篇文章(同时删去原书 1 篇文章),这样,由原书的 67 篇文章增加到 83 篇,增幅为 21%。出版社认为增加内容较多,不宜重印,因而采用了“第 2 版”的形式修订再版。

本书第 2 版的出版得到中航上海商用航空发动机有限责任公司的支持,并北京航空航天大学出版社的全力配合,在此表示衷心的感谢。

陈光

2013 年 8 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,发表在专业性的期刊上;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	1
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
高涵道比涡轮风扇发动机发展综述	19
从新加坡航空公司的波音 777 在北京首都国际机场迫降谈起	29
支线客机发动机发展	38
为 AE100 提供的三种发动机结构设计比较	46
我国干线客机用发动机发展途径探讨	52
四种军用发动机发展试验程序的变化	58
访问苏联中央航空发动机研究院	62
助推发动机在民航客机上的应用	67
军用发动机	73
几种军用涡扇发动机的结构设计分析	75
EJ200 发动机的结构设计特点	81
从 F100 - PW - 100 到 F119 - PW - 100: 回顾航空发动机研制观点的转变	87
F100 - PW - 220 发动机: F100 - PW - 100 发动机提高可靠性的改型	95
F110 - GE - 129 EFE 的发展与设计特点	99
F119 发动机的发展与设计特点	106
RB199 发动机的发展与设计特点	114
F414 发动机设计与研制特点	122
RD - 93 发动机结构设计特点分析	128
民用发动机	147
CFM56 系列发动机结构与研制特点	149
CF6 - 80C2 发动机结构设计特点	207
PW4000 发动机设计特点	214
PW8000 高涵道比涡轮风扇发动机	221
RB211 三转子涡轮风扇发动机	226
RB211 - 535E4 发动机设计特点	239
遑达 600 发动机设计特点	248
遑达 700 发动机设计特点	254
遑达 500 发动机设计特点	262
用于 A380 的遑达 900 发动机	266
波音 777 及其所用发动机一些设计特点	271

GE90 发动机发展与设计特点	286
GE90 - 115B 设计特点分析	300
苏联的第三代民用涡轮风扇发动机	307
用于波音 787 的 GENx 发动机设计特点	312
用于波音 787 的遛达 1000 发动机设计特点	323
PW1000G 齿轮传动风扇发动机设计特点	334
LEAP 发动机的研制与设计特点	342
主要零部件设计	349
航空发动机转子的典型结构和新结构	351
航空发动机叶片的典型结构和新结构	394
EJ200 高压压气机结构设计改进	435
整体叶盘在国外发动机中的应用分析	440
新型发动机零部件中的一些新结构	459
高压压气机钛着火的危害与防止措施	472
雨水对飞机发动机的影响	477
飞机发动机吸入飞鸟的危害与防止措施	483
IMI 834 高温钛合金在压气机中的应用	493
GE 公司低转速研究用压气机与涡轮试验器	495
CF6 - 80C2 风扇的包容试验	498
鸟撞击与风扇叶片的设计	500
CFM56 - 3 发动机本机平衡技术	505
离心喷油式环形燃烧室	511
传动、滑油及其他系统	515
现代航空发动机滑油系统设计特点	517
新型发动机附件传动机构的设计特点	521
波音 757 发动机指示与机组报警系统	524
国外航空发动机滚动轴承的发展概况	529
航空发动机轴承滑蹭损伤与防止措施	550
离心式油滤	557
航空发动机的可靠性与维修性	561
提高航空发动机可靠性的措施	563
提高波音 777 飞机发动机可靠性的措施	591
提高 GE90 发动机维修性的主要措施	602
BR710 发动机提高可靠性和耐久性的试验	608
PW2000 发动机提高可靠性的措施	612
双发客机的延程飞行与发动机的可靠性	615
漫谈航空发动机的包容能力	618
人素工程在发动机维修性设计中的应用	622
漫谈航空发动机寿命	627