



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

陈光 洪杰 马艳红 编著

航空燃气涡轮 发动机结构



普通高等教育“十一五”国家级规划

航空燃气涡轮发动机结构

陈 光 洪 杰 马艳红 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是根据普通高等教育“十一五”国家级规划教材的要求编写的,对现代航空燃气涡轮发动机的典型结构进行了较为全面、系统的论述,对航空燃气轮机的主要部件从功能、设计要求、典型结构、工作环境及受力等方面进行了分析;对发动机所需的附属系统、附件及传动装置进行了分类和设计特点的介绍;此外,根据现代航空发动机发展的趋势和要求,对航空发动机的研制历程、环保要求及防范措施,以及特种燃气涡轮发动机的发展特点也进行了分析和介绍。为方便读者学习,每章后提供了思考题。

本书可作为航空院校飞行器动力专业和流体机械专业高年级本科生和研究生的教材,可供航空发动机工厂,研究所,空军、海军和陆军航空兵部队以及相关院校有关人员作为参考用书,也可供从事工业车辆和舰船用燃气轮机工作的有关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空燃气涡轮发动机结构 / 陈光,洪杰,马艳红编
著. --北京:北京航空航天大学出版社,2010.8
ISBN 978-7-5124-0171-6

I. ①航… II. ①陈… ②洪… ③马… III. ①航空发
动机—燃气轮机—结构 IV. ①V235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 148591 号

版权所有,侵权必究。

航空燃气涡轮发动机结构

陈 光 洪 杰 马艳红 编著
责任编辑 张冀青

*

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: bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:30 字数:672 千字

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-0171-6 定价:78.00 元

前 言

本书是为航空院校飞行器动力专业和流体机械专业编写的,是在由陈光任主编,于1988年出版,并于1994再版的《航空燃气涡轮发动机结构设计》一书的基础上,补充改写的。原书自1988年出版后,得到各方面的好评,并于1992年被原航空航天工业部评为第三届航空高校优秀教材一等奖,同年,还获得国家教委颁发的国家优秀教材奖。

在重新编写过程中,保持了原书既注重发动机结构发展变化的过程,又深入分析现代航空发动机的各种先进技术的特色,使本书反映出当代航空发动机的发展水平;同时着重阐述了航空燃气涡轮发动机各部件及主要零组件的结构设计基本原则与要求,以及相应的具体设计方案和措施,使读者在阅读本书后,不仅能了解许多航空发动机的典型结构和新发展的结构形式,而且从中还能掌握一些分析、设计发动机结构的方法。

在原书的基本结构框架下,本书又补充了最近20余年发展的新型军、民用燃气涡轮发动机的结构,使本书内容能反映出航空发动机结构的最新发展水平。

本书共分12章,除对航空燃气涡轮发动机总体结构设计、各主要部件及附属系统进行论述外,还论述了发动机的环保要求及防范措施,以及特种燃气涡轮发动机和航空燃气涡轮发动机的研究、发展与使用等。同时,第一次在发动机结构设计的著作中论述了防错设计与安全设计。

本书可作为航空发动机工厂,研究所,空军、海军与陆军航空兵部队以及相关院校有关人员的参考用书。由于许多航空燃气涡轮发动机经过改型,在工业车辆及舰船上已得到广泛应用。因此,本书也可供从事工业车辆和舰船用燃气轮机工作的有关人员参考。

第1章、第10章与第12章由陈光教授修改编写,第5~9章、第11章由洪杰教授修改编写,第2~4章由马艳红副教授修改编写。全书由陈光教授和洪杰教授进行审核与修订。在编写过程中,张大义博士后,朱彬、陈璐路、刘书国、陈萌、刘宝龙博士和李昊宇硕士协助进行了文字和图表的编辑工作。

由于编者的水平与能力有限,书中错误与不当之处恳望读者批评指正。

陈 光

2010年7月于北航

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 航空燃气涡轮发动机的功用与要求	1
1.2 航空燃气涡轮发动机的基本类型	2
1.2.1 涡喷发动机	5
1.2.2 涡桨发动机	6
1.2.3 涡轴发动机	7
1.2.4 涡扇发动机	9
1.2.5 螺桨风扇发动机.....	13
1.3 航空燃气涡轮发动机发展概况.....	17
思考题	22
第 2 章 压气机	23
2.1 概 述.....	23
2.2 轴流压气机转子.....	32
2.2.1 转子的基本结构形式.....	32
2.2.2 转子叶片及其与轮盘的连接.....	46
2.3 轴流压气机静子.....	60
2.3.1 风扇静子机匣.....	61
2.3.2 压气机机匣与静子叶片.....	64
2.4 进气、防冰与防外物进入装置	71
2.4.1 进气机匣与进口导流叶片	71
2.4.2 防冰装置.....	71
2.4.3 防止外物打伤的措施.....	73
2.5 防喘振装置.....	76
2.5.1 放气机构.....	77
2.5.2 可调进口导流叶片与可调静子叶片.....	78
2.5.3 可变弯度的进口导流叶片	79
2.5.4 处理机匣.....	80

2.5.5	多转子发动机	80
2.6	离心压气机	81
2.6.1	概 述	81
2.6.2	结 构	85
2.7	压气机主要零件的材料及表面防护	90
2.7.1	钛合金	90
2.7.2	高温合金	92
2.7.3	铝合金	92
2.7.4	合金钢	92
2.7.5	复合材料	93
2.7.6	表面防护	93
2.8	典型故障	97
2.8.1	外来物打伤	97
2.8.2	压气机钛着火故障	98
	思考题	104
第3章	涡轮	105
3.1	概 述	105
3.2	涡轮转子	112
3.2.1	转子的连接结构	112
3.2.2	转子叶片及其与轮盘的连接	122
3.3	涡轮静子	134
3.3.1	涡轮机匣	135
3.3.2	导向器	143
3.4	涡轮部件的冷却	151
3.4.1	涡轮主要零件的温度分布	151
3.4.2	涡轮部件的冷却系统	154
3.5	涡轮主要零件的材料及其表面防护	164
3.5.1	涡轮叶片	164
3.5.2	涡轮盘	166
3.5.3	涡轮轴	166
3.5.4	涡轮机匣、衬段及导向器内外环	166
3.6	典型故障	169
3.6.1	低压涡轮轴飞转	169



3.6.2	涡轮盘榫齿裂纹	171
3.6.3	涡轮叶片故障	173
	思考题	174
第 4 章	燃烧室与加力燃烧室	175
4.1	燃烧室	175
4.1.1	概 述	175
4.1.2	燃烧室的基本类型	179
4.1.3	燃烧室基本构件的结构	198
4.1.4	燃烧室主要零件的材料及其表面防护	219
4.1.5	典型故障	221
4.2	加力燃烧室	222
4.2.1	概 述	222
4.2.2	加力燃烧室的结构	225
4.2.3	加力燃烧室基本构件的结构	235
4.2.4	加力燃烧室的材料	243
	思考题	243
第 5 章	排气装置	244
5.1	尾喷管	244
5.1.1	直流式尾喷管	244
5.1.2	推力矢量喷管	257
5.2	反推力装置	261
5.2.1	概 述	261
5.2.2	反推力装置的基本结构	262
	思考题	263
第 6 章	减速器	264
6.1	概 述	264
6.1.1	涡桨发动机的减速器	264
6.1.2	涡轴发动机的减速器	266
6.1.3	涡扇发动机的减速器	266
6.2	减速器的结构	268
6.2.1	涡桨发动机的减速器结构	268

6.2.2	涡轴发动机的减速器结构	273
6.2.3	涡扇发动机的减速器结构	275
6.3	测扭机构	278
	思考题	281
第7章	总体结构	282
7.1	负荷与受力分析	282
7.1.1	作用在各主要零组件上的负荷	282
7.1.2	气体轴向力与发动机的推力	282
7.1.3	发动机各部件上气体轴向力的分布及转子轴向力的减荷	286
7.1.4	气体力作用于组合件上的扭矩	289
7.1.5	惯性力与惯性力矩	291
7.2	转子支承方案	293
7.2.1	单转子支承方案	295
7.2.2	双转子支承方案	298
7.2.3	三转子支承方案	304
7.2.4	止推支点在转子中的位置	306
7.3	联轴器	307
7.3.1	刚性联轴器	307
7.3.2	柔性联轴器	310
7.4	支承结构	316
7.4.1	基本要求	316
7.4.2	典型支承结构	318
7.4.3	滚动轴承的打滑与滑蹭损伤	329
7.4.4	带弹性支座挤压油膜的支点结构	331
7.5	承力系统	334
7.5.1	承力框架	335
7.5.2	发动机安装节	342
	思考题	344
第8章	附件传动装置与附属系统	345
8.1	附件及附件传动装置	345
8.1.1	发动机附件	345
8.1.2	附件传动装置	346

8.2 滑油系统	361
8.2.1 概 述	361
8.2.2 供油量与滑油箱	361
8.2.3 滑 油	364
8.2.4 滑油系统	365
8.2.5 几种典型的滑油系统	366
8.3 启动系统	373
8.3.1 概 述	373
8.3.2 燃气涡轮发动机的启动过程	373
8.3.3 启动机	375
思考题	378
第 9 章 环保要求与防范措施	379
9.1 概 述	379
9.1.1 航空发动机噪声的评价标准	379
9.1.2 航空发动机排放的要求	383
9.2 发动机噪声源	385
9.2.1 叶轮机的噪声源	386
9.2.2 排气噪声源	387
9.2.3 噪声辐射的指向性	388
9.3 发动机中抑制噪声的方法	389
9.3.1 叶轮机噪声的抑制	390
9.3.2 排气噪声的抑制	392
9.3.3 吸声衬垫	396
9.4 燃烧室的排放	401
9.4.1 污染排放的主要因素	401
9.4.2 排气污染物的控制技术	402
9.4.3 低排放燃烧室	405
思考题	410
第 10 章 安全设计与防错设计	411
10.1 安全设计	411
10.1.1 防止低压涡轮轴飞转的措施	411
10.1.2 防止风扇转子甩出的措施	414

10.1.3	防止风扇叶片甩脱后产生过大振动	415
10.1.4	滑油系统中设置最低滑油压力警告装置	416
10.2	防错设计	416
	思考题	418
第 11 章	特种燃气涡轮发动机	419
11.1	飞机辅助动力装置	419
11.1.1	概 述	419
11.1.2	结 构	419
11.2	助推发动机与升力发动机	424
11.2.1	概 述	424
11.2.2	助推发动机	425
11.2.3	升力发动机	426
11.3	一次使用发动机	429
11.3.1	一次使用发动机的设计原则	429
11.3.2	一次使用发动机的设计方法	429
11.3.3	典型一次使用发动机的结构分析	432
	思考题	439
第 12 章	航空发动机的研制与使用	440
12.1	航空发动机的研制	440
12.1.1	航空发动机的基础研究	441
12.1.2	航空发动机的预先研究	441
12.1.3	航空发动机的型号研制	443
12.1.4	航空发动机的使用发展	444
12.2	航空发动机的结构完整性	444
12.2.1	概 述	444
12.2.2	发动机的结构完整性	445
12.2.3	发动机的包容性	449
12.3	航空发动机的寿命与可靠性	450
12.3.1	航空发动机寿命的概念	450
12.3.2	航空发动机可靠性的概念	452
12.3.3	航空发动机的可靠性指标	454
12.3.4	航空发动机的延寿	456



12.4 航空发动机的维修性.....	457
12.4.1 维修性的主要指标.....	457
12.4.2 维修方式.....	458
12.4.3 发动机的维修性设计.....	459
12.5 现代航空发动机的研制特点.....	461
12.5.1 早期的 F100 发动机	461
12.5.2 提高可靠性的 F100—PW—220 发动机	462
12.5.3 F100—PW—229 发动机	463
12.5.4 F119—PW—100 发动机	464
思考题.....	465
参考文献.....	466

第 1 章 概 述

1.1 航空燃气涡轮发动机的功用与要求

航空燃气涡轮发动机是现代固定翼飞机和直升机的主要动力装置(少数轻型、小型飞机和直升机采用航空活塞式发动机),为飞机提供推进力,为直升机提供升力。在涡轮喷气、涡轮风扇发动机中,发动机的推力就是推进飞机前进的推进力,而在带螺旋桨的发动机(涡轮螺旋桨发动机与活塞式发动机)中,发动机输出的是轴功率,通过推进器(即螺旋桨),将功率转变为推进飞机的拉力。在直升机中,发动机输出的功率通过减速器并转向,驱动旋翼旋转,使直升机腾空飞翔。由此可以看出,作为飞行器的动力装置,一般应由发动机(是将燃料的化学能量转变为热能,再转化为机械能的热力机械)与推进器两部分组成。在直接产生推力的涡轮喷气、涡轮风扇和火箭等发动机中,发动机与推进器是合二为一的;而在涡轮螺旋桨、涡轮轴和活塞式发动机中,推进器是螺旋桨或旋翼。

飞机或直升机在飞行中一旦发动机损坏而停车,飞机会因失去推进力而丧失速度与高度,直升机会丧失升力而下坠,如果处理不当(特别在高速飞行时)就会出现摔机事故。因此,发动机能否正常工作直接影响飞行器的飞行安全,故而将发动机称为飞机的心脏。不仅如此,发动机性能的好坏也会直接影响飞行器的性能,对飞行器的发展起到关键的作用。

早期的飞机、直升机上均采用航空活塞式发动机,从 20 世纪 40 年代后期燃气涡轮发动机开始进入航空领域后,经过 60 余年的发展,目前航空燃气涡轮发动机已发展到品种、型号繁多,结构设计日臻完善、简单,性能优良,使用可靠,维护方便的程度,广泛应用于各种类型的飞行器上。

评定航空燃气涡轮发动机品质的主要指标有性能参数、可靠性和耐久性等。性能参数中重要的有推力(或功率)、推重比(发动机推力与发动机质量之比值)或功重比(发动机功率与发动机质量之比值)以及耗油率等。对于战斗机而言,在满足推力的前提下,主要追求高的推重比;对于客机而言,则要求有低的耗油率。至于发动机使用的可靠性与耐久性,不仅影响到全寿命期的成本,而且还影响到飞行器的出勤率与飞行安全,所以是至关重要的评定指标。在 20 世纪 70 年代,为了满足高性能的空中优势战斗机的需要,曾一度单纯追求高的推重比,相对地对使用可靠性与耐久性考虑欠周,结果在使用中,这类发动机不断出现故障,严重影响到战斗机的战斗力。为此,在 20 世纪 70 年代中期以后,对于战斗机的发动机,不再单纯追求高的推重比,而是从可靠性、耐久性、维修性及性能等方面统一考虑,也就是说,为了满足前三项的要求,宁可在性能方面做些牺牲。对于客机的发动机,除要求工作安全可靠、寿命长以外,不断降低发动机的耗油率,减缓发动机性能恶化(即性能衰退)的趋势,是发动机设计、制造及研

究工作者长期努力的目标。

进入 21 世纪后,绿色航空已成为新一代飞机必须遵循的要求,为此,降低航空发动机的噪声与排污值,以满足新的、更加严格的噪声与排污规范是发动机研制工作中的重点工作之一。

早期的航空燃气涡轮发动机,基本上是一机多用,即同一型号的发动机,可供不同类型的飞机(战斗机、客机及运输机)选用。随着飞机性能的提高,已转向专门为战斗机、客机及运输机研制发动机,使发动机在性能上能与飞机完全匹配,获得最佳设计方案。

半个多世纪以来,随着航空发动机总压比、涡轮前燃气温度和推重比不断提高,以及新材料、新工艺应用不断增多,导致发动机结构日益复杂,发动机主要部件的工作条件日益苛刻,从而发动机结构故障不断发生,后果严重。大量结构故障引起的惨痛教训引起了各国官方的重视。在认真总结经验教训的基础上,美国空军等部门于 1969 年制定了“发动机结构完整性计划”(ENSIP),并于 1975 年 10 月在该计划的基础上,修订了在 20 世纪 50 年代初颁布的《军用发动机通用规范》MIL—E—5007,编制出版了 MIL—E—5007D《军用涡喷涡扇发动机通用规范》。随后,美国空军又于 1985 年 9 月颁布了 MIL—E—87231《航空涡喷涡扇发动机军用规范》,取代了 MIL—E—5007D。

我国于 1987 年颁布了 GJB 241—87《军用涡轮喷气发动机通用规范》与 GJB 242—87《军用涡轮螺旋桨发动机通用规范》。中国民用航空总局于 1988 年 2 月颁布了 CCAR—33《中国民用航空规章第 33 号 航空发动机适航标准》,又于 2002 年 4 月颁布修订了 CCAR33—R1《航空发动机适航规定》。

所有这些规范与条例都是研制发动机时必须遵从的。例如,在研制军用发动机时,首先应根据 GJB 241—87 的要求并结合发动机的具体情况,拟定该发动机的《型号研制规范》,在得到军方认可后作为研制工作的依据,安排研制工作的所有项目,开展设计、试验与试车工作;军方将按型号规范的要求,在研制工作的关键节点时进行验收。严格按照发动机的型号规范开展研制工作,是保证所研制的发动机取得成功的必要条件。我国的航空发动机研制工作,也已开始推行“结构完整性计划”。发动机结构完整性的提出和发展,表明发动机研制的指导思想发生了根本性改变,即从规定发动机最高性能指标转向制定更高的耐久性要求;在设计方法上,则要求按发动机的实际使用要求确定各零、部件的设计状态和载荷,即按发动机的设计任务循环进行结构强度和寿命的设计与试验,在对各类飞机的大量飞行数据进行统计分析的基础上制定加速任务循环,并根据它来考核整机的可靠性和耐久性。在发动机的整个研制过程中都十分重视调整和处理发动机性能与结构、强度之间的关系,以期实现在现有水平上的最佳折中。

1.2 航空燃气涡轮发动机的基本类型

航空燃气涡轮发动机有四种基本类型,即涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、涡轮螺旋桨发动机和涡轮轴发动机。20 世纪 80 年代后期又发展了一种介于涡轮风扇发动机与涡轮螺旋桨发动机之间的螺旋桨风扇发动机。这些发动机中,均有压气机、燃烧室和驱动压气机的燃气涡轮,因



此这类发动机统称为燃气涡轮发动机,作为飞行器的动力装置则称为航空燃气涡轮发动机。

在航空燃气涡轮发动机中,发动机工作时,进入发动机的空气经压气机压缩提高压力、减小体积后流入燃烧室,并与喷入的燃油(航空煤油)混合后燃烧,将燃料中的化学能转化为热能,形成高温、高压燃气,再进入驱动压气机的燃气涡轮中膨胀做功,使涡轮高速旋转并输出驱动压气机及发动机附件所需的功率。经过燃气涡轮的燃气,仍具有一定的压力和温度。所有燃气涡轮发动机都是因为这股燃气具有一定的能量,才能产生发动机的推力或输出功率。利用这股燃气能量的方式可以有多种形式,因而可相应得出不同类型的发动机。

压气机、燃烧室以及驱动压气机的燃气涡轮(简称涡轮)所组成的装置称为核心机,因为它用来提供高压、高温燃气的,因此又称为燃气发生器。需要指出的是,只是在单转子发动机中,核心机是燃气发生器;若在多转子发动机中,核心机则是燃气发生器的一部分。

在高增压比的压气机中,为了获得大的稳定工作范围,常将其分为串联的两部分,分别由两个涡轮以不同的转速驱动,压气机中位于前端的部分,空气压力较低,称为低压压气机;压气机中位于后端的部分称为高压压气机。相应地,涡轮也分为低压涡轮和高压涡轮。这种结构形式称为双转子结构。

在涡轮风扇发动机中,伸入外涵的低压压气机级组称为风扇,位于内涵的叶片起到低压压气机的作用,为内涵气流增压。在高涵道比的涡轮风扇发动机上,安装在风扇之后与之同轴的、对内涵增压的压气机级组称为增压级。增压级的主要作用是保证进入内涵的空气流量和一定的增压能力。

在燃气涡轮发动机中,与压气机、风扇等增压系统无机械连接的,其有效功率用于传动螺旋桨、旋翼或地面机械(如发电机)的涡轮级组,称为自由涡轮,也称自由动力涡轮。

如图1-1(a)所示,核心机后紧跟一个尾喷管,由核心机出来的燃气在尾喷管中膨胀,以高速从喷管中排出产生推力,这种发动机称为涡轮喷气发动机,简称涡喷发动机。国产涡喷发动机以“涡喷”二字汉语拼音的首字母组成词冠,并紧跟产品代号,以此来命名,例如WP6、WP7等。余类推。

图1-1(b)、(c)、(d)中,由核心机涡轮出来的燃气流入其后的另一涡轮中继续膨胀做功,然后由尾喷管排出。这个用于传动其他部件的涡轮,一般称为动力涡轮。大多数发动机中,动力涡轮与燃气发生器的涡轮没有机械连接,它们均各自工作于不同的转速,所以,动力涡轮也可称为自由涡轮;但也有少数发动机的动力涡轮与燃气发生器的涡轮连接在一起,如WJ5、WJ6发动机。由于动力涡轮是在核心机涡轮之后,燃气压力较前者低,因此也称动力涡轮为低压涡轮。如果动力涡轮驱动位于燃气发生器前的风扇转子,这就是涡轮风扇发动机(见图1-1(d)),简称涡扇发动机,国产代号为WS,如WS9、WS10。如果动力涡轮驱动减速器,然后带动螺旋桨,就成为涡轮螺旋桨发动机(见图1-1(b)),简称涡桨发动机,国产代号为WJ,如WJ5、WJ6。动力涡轮直接或通过减速较小的减速器驱动由直升机主减速器传动的旋翼,就是涡轮轴发动机(见图1-1(c)),简称涡轴发动机,国产代号为WZ,例如WZ6。

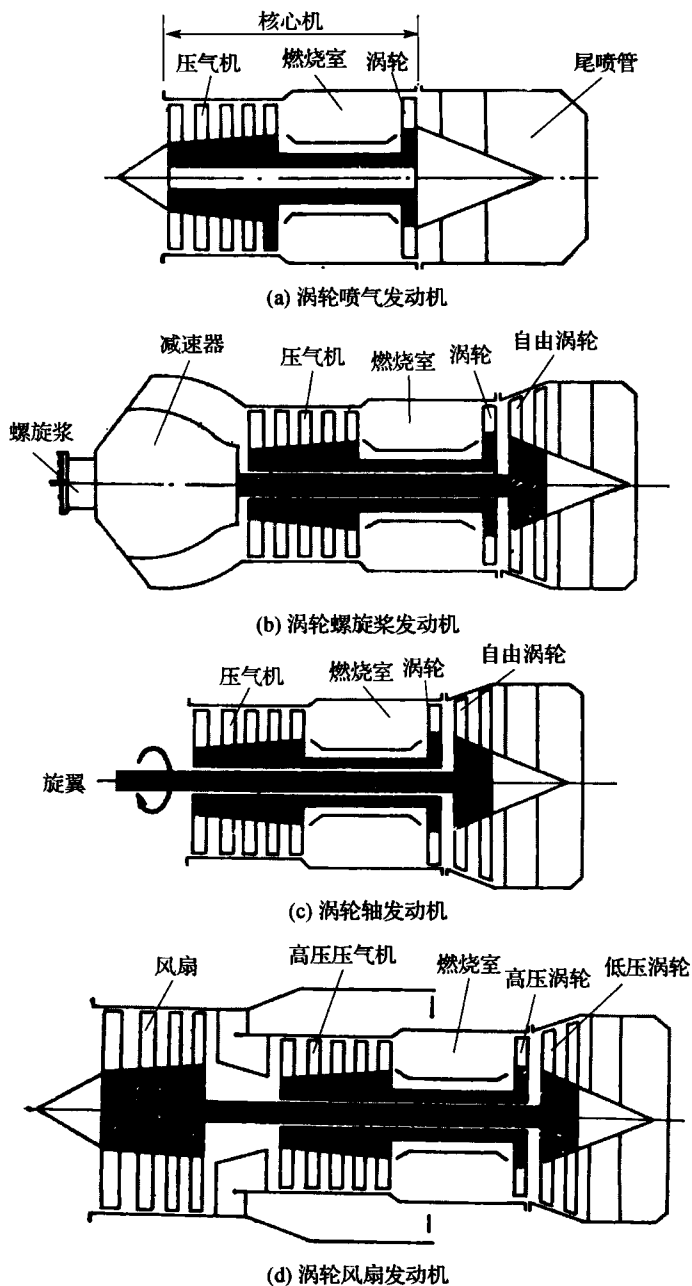


图 1-1 各种航空燃气涡轮发动机与核心机的关系



由此可见,从工作原理上看,同一个燃气发生器,可以配不同的部件,而成为不同类型的发动机。而核心机是燃气发生器的核心部分,因此,如果能发展出一台具有先进水平的核心机,即可获得多种性能良好的发动机;同时还可以将这种性能先进的核心机放大或缩小,成为不同流量的核心机,衍生发展出不同性能的发动机。因此,发展高性能的核心机是提高发动机性能,满足不同飞机要求的一种有效措施。

1.2.1 涡喷发动机

涡喷发动机是20世纪50年代应用最为广泛的航空燃气涡轮发动机,当时不仅是高速战斗机的唯一动力,而且也被许多轰炸机和旅客机采用。图1-2所示为涡喷发动机简图。由于涡喷发动机的推力是由高速排出高温燃气所获得的,所以,在得到推力的同时,大量燃料燃烧所释放的能量以燃气的动能和热能的形式排出发动机,能量损失较大,因此其耗油率较高。

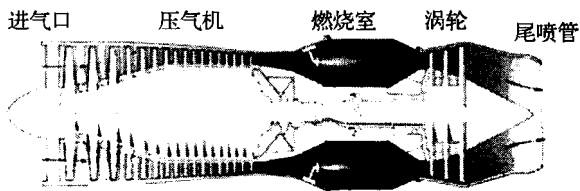
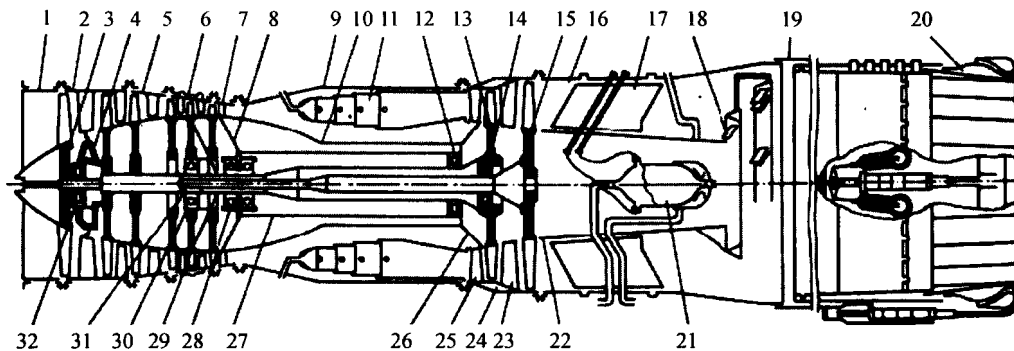


图 1-2 涡喷发动机简图

图 1-3 所示为带加力燃烧室的双转子涡喷发动机简图。



- 1,2,5,6,7—压气机机匣;4,8,26—支承机匣;3,29—低压、高压转子;9—燃烧室外机匣;10—燃烧室内机匣;
11—火燃筒;12,14—低压、高压转子支点;13,15—低压、高压涡轮转子;16—加力燃烧室外机匣;17—径向支板;
18—火焰稳定器;19—易卸环;20—可调节喷口;21—加力燃烧室点火器;22—扩散机匣内锥体;
23,25—导向器;24—燃气涡轮机匣;27—轴承机匣;28,30,32—压气机支承;31—套齿

图 1-3 带加力燃烧室的双转子涡喷发动机简图

为了短时间内提高涡喷发动机的推力,可在涡轮与尾喷管之间安装加力燃烧室,当需要增加推力时,向燃气发生器后的燃气中补充喷入燃油,进一步燃烧以提高燃气从尾喷口排出的速度,达到增加推力的目的,此时的推力称为加力状态的推力,简称加力推力(也称最大推力)。加力状态下,由于排出的燃气温度与速度均大大提高,因而耗油率比不开通加力时成倍增加。

在装有加力燃烧室的发动机中,尾喷管的出口面积应做成可调节的,以保证在开通加力状态下排出体积更大的燃气,气流稳定向后流动。

国产歼六、歼七、歼八等战斗机上,均采用了带加力燃烧室的涡喷发动机,图 1-4 所示为我国生产的用于歼七飞机的 WP7 乙 B 型发动机,加力燃烧室部分未显示出。

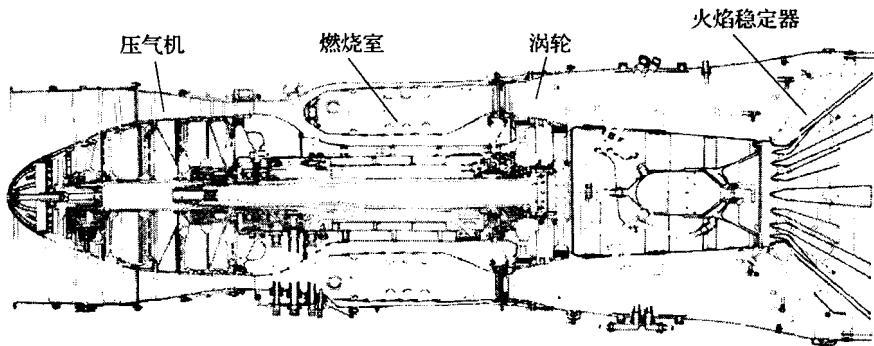


图 1-4 国产的 WP7 乙 B 型发动机

我国自行研制的 WP14“昆仑”发动机(于 2002 年 5 月定型)即为带加力燃烧室的涡喷发动机,这是我国自行研制成功的第一台涡喷发动机。

1.2.2 涡桨发动机

在涡桨发动机(见图 1-5)中,从核心机出来的燃气能量,绝大部分在自由涡轮中膨胀做功,使自由涡轮高速旋转,然后通过减速器将转速降到 $1000 \sim 2000 \text{ r/min}$,以驱动螺旋桨;燃气中剩下的很少能量在尾喷管中膨胀,产生小部分推力。因此,涡桨发动机除输出轴功率外,还输出少量推力。在有些发动机中,为了简化结构设计,自由涡轮与核心机的涡轮串装在一起,形成单轴发动机,图 1-6 所示的发动机就是这种结构。涡桨发动机由于有直径较大的螺旋桨,其飞行速度受到限制,一般用于 $Ma=0.5 \sim 0.7$ 的飞机上;但是,由于它的排气能量损失少,推进效率高,所以耗油率低。20 世纪 50 年代研制的旅客机和运输机上多采用这种发动

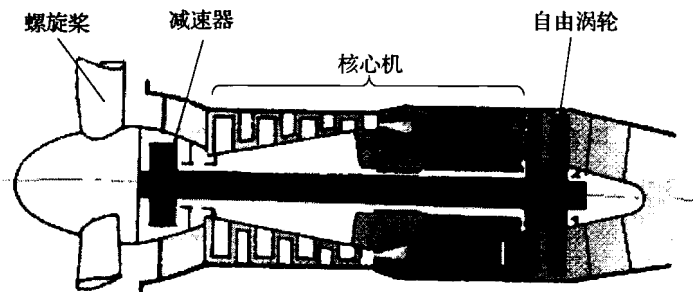


图 1-5 涡桨发动机简图