



“十三五” 航空航天专业规划教材

航空发动机原理与结构

HANGKONG FADONGJI YUANLI YU JIEGOU

黄燕晓 瞿红春 主编

航空工业出版社

“十三五” 航空航天专业规划教材



航空发动机原理与结构

黄燕晓 瞿红春 主 编

航空工业出版社

北 京

内 容 简 介

本书内容主要涉及与航空发动机相关的基础知识和专业知识。具体内容包括：与发动机原理和结构相关的工程热力学、气体动力学和传热学的基础知识；航空发动机的基本工作原理和工作特性；航空发动机总体结构与附件传动；发动机冷端和热端部件的结构形式、连接方式等；发动机典型的工作系统以及发动机维修基本理念和基本维修方法等。

本书可作为航空院校航空发动机维修、航空机电设备维修、飞机结构维修和航空电子设备维修等专业的发动机课程教材，也可作为有志于从事航空器维修的工程技术人员进行学习和培训的自学教材和参考资料。

考虑到行业的特殊性，为同实际工作保持一致，书中英制单位、国际单位并存。

图书在版编目 (C I P) 数据

航空发动机原理与结构 / 黄燕晓, 瞿红春主编. --

北京: 航空工业出版社, 2015. 9

“十三五” 航空航天专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0878 - 7

I. ①航… II. ①黄… ②瞿… III. ①航空发动机—
高等职业教育—教材 IV. ①V23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 218446 号

航空发动机原理与结构

Hangkong Fadongji Yuanli yu Jiegou

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936597 010 - 84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2015 年 9 月第 1 版

2015 年 9 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 16.25

字数: 415 千字

印数: 1—3000

定价: 39.00 元

总 前 言

经过几十年的快速发展，我国的制造业规模已跃居世界第一位，建立起门类齐全、独立完整的制造体系，成为支撑我国经济社会发展的重要基石。为完成中国制造由大变强的战略任务，党中央、国务院正式发布了《中国制造2025》规划。其中，航空航天作为装备制造业的重要组成部分和高精尖科学技术的重要代表，被列为国家大力推动发展的重点领域。

随着我国航空航天技术的迅猛发展，亟需大量高水平、高素质的科研与技能型人才，国内众多的高校、职业院校纷纷开设航空航天相关的院系和专业。但与教学配套的教材储备却相对薄弱，现有的航空航天教材多存在着版本老、案例少、知识体系与工程实际相脱节等问题，不能完全满足院校的教学需要。

鉴于此，中航出版传媒有限责任公司（航空工业出版社）广泛联系多所航空航天院校，密切沟通、深入交流、共同组织，计划在“中国制造2025”规划的指导下，在国家“十三五”规划期间，依托航空航天院校最新的教学、科研成果和我司多年的出版经验积累，开发一套紧扣课改、内容充实、体例新颖、企业参与、配套丰富的新教材——“十三五”航空航天规划教材。

该套教材计划包含飞行器的原理基础、结构技术、材料技术、气动技术、推进技术，以及发动机、机载设备、航电系统等多方面的知识，覆盖航空航天的多个专业方向，在国家“十三五”期间陆续出齐。

衷心希望本套教材最终能达到服务院校教学需要、为祖国培养高素质航空航天专业人才、助力“中国制造2025”的目的。

编委会

前 言

航空发动机原理、构造与系统是飞机维修类专业的核心课程，同时又是航空器维修基础执照考试大纲规定的重点内容，因此，要求飞机维修类专业学生必须深入、系统、全面地学习。

编者根据“2012版航空机电设备维修专业培养方案”的要求，参考AC-66R1-03（咨询通告）——“民用航空器部件修理人员执照考试大纲”中燃气涡轮发动机模块的要求，总结多年来收集到的涉及发动机方面的资料，开展教材的编写工作。

基于该教材面对的学生今后大都从事航空器维修工作的情况，在本书的编写过程中，着重分析与航空发动机维修相关的基本内容；其次，该专业学生今后工作的机型多种多样，为确保每个学生都能在今后的工作中具备扎实的理论基础，本书尽可能选取不同的机型进行知识讲解；另外，由于学生的专业基础比较薄弱，物理、工程热力学、传热学和气体动力学等方面知识较为有限，为保证学生学习顺利，特在第1章第1.5节安排相关内容，任课老师可以根据实际需要先行讲解。

本书着重讲解航空发动机基本原理、总体结构和附件传动、冷端和热端部件的原理与结构、各种类型民用机型的工作特性、典型工作系统的组成和功用以及发动机使用与维修等方面的内容。需要说明的是，受课时安排的限制，教材中的内容不一定都能讲完，因此，一些难度较大的部分，标题均打上*号作为标记，任课老师可以根据教学的需求自由选择。

本书由黄燕晓和瞿红春进行结构设计和统稿，具体分工为：第1、2、4、7章由黄燕晓编写，第3、5章由但敏编写，第6章由张弛编写。另外，作为2014年首届全国职业院校技能大赛飞机发动机拆装调试与维修赛项一等奖的获得者，本专业2015届毕业生岳军、黄奇奇同学在资料整理、文字校对等方面也为本书做了大量有益的工作。

本书从开始构思到如今成稿，参考了大量相关文献、飞机发动机维护手册及网络资料，并得到中国民航大学发动机系张银波老师的悉心指导，同时学院主要领导对教材的筹划、编写及出版都给与了极大的支持，在此一并表示感谢。

中国民航大学航空工程学院发动机系李书明教授、海航航空技术有限公司技术服务部的陈国焉工程师对本书进行审阅，并提出了许多中肯的修改建议，在此表示衷心地感谢。

由于作者理论水平和实践经验有限，书中的错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者
2015年3月

目 录

第 1 章 发动机概述与基础知识	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 引言	(1)
1.1.2 发动机发展历程	(2)
1.1.3 发动机的作用与要求	(2)
1.2 发动机典型类型与特点	(3)
1.2.1 涡轮喷气发动机	(3)
1.2.2 涡轮螺旋桨发动机	(4)
1.2.3 涡轮轴发动机	(5)
1.2.4 涡轮风扇发动机	(6)
1.2.5 涡桨风扇发动机	(7)
1.3 发动机组成和基本工作	(7)
1.3.1 涡轮发动机组成	(7)
1.3.2 发动机热力循环	(8)
1.3.3 涡轮发动机推力	(10)
1.3.4 发动机重要参数	(11)
1.3.5 发动机性能指标	(12)
1.4 典型民航发动机机型*	(13)
1.4.1 CFM56 涡扇发动机	(13)
1.4.2 V2500 涡扇发动机	(14)
1.4.3 GE90 涡扇发动机	(15)
1.5 基础知识	(16)
1.5.1 物质	(16)
1.5.2 力学知识	(16)
1.5.3 热力学概念	(17)
1.5.4 热力学第一定律	(22)
1.5.5 气体的热力性质	(25)
1.5.6 热力过程	(28)
1.5.7 热力学第二定律	(29)
1.5.8 气体的流动	(32)
1.5.9 气体动力循环*	(38)
1.5.10 传热学基础知识*	(40)

第 2 章 发动机总体结构与附件传动	(42)
2.1 转子连接和联轴器	(42)
2.1.1 刚性联轴器	(42)
2.1.2 柔性联轴器	(43)
2.2 航空发动机主轴承	(44)
2.2.1 轴承类型	(44)
2.2.2 航空发动机主轴承	(45)
2.2.3 挤压油膜轴承	(46)
2.3 转子支承支点布局	(47)
2.4 转子支承方案	(48)
2.4.1 单转子支承方案	(49)
2.4.2 双转子和三转子支承方案	(50)
2.4.3 止推支点在转子中的位置	(53)
2.5 封严装置	(54)
2.5.1 封严装置的功用与种类	(54)
2.5.2 轴承腔封严	(56)
2.6 附件传动装置	(57)
2.6.1 飞机发动机附件	(57)
2.6.2 附件传动装置在发动机上的传动与安装	(57)
2.6.3 齿轮箱结构	(59)
第 3 章 发动机冷端部件原理与结构	(62)
3.1 进气道	(62)
3.1.1 亚声速进气道	(62)
3.1.2 超声速进气道	(64)
3.2 压气机	(65)
3.2.1 离心式压气机	(66)
3.2.2 轴流式压气机基本组成与增压原理	(69)
3.2.3 多级轴流式压气机	(74)
3.2.4 性能参数与流动损失	(76)
3.2.5 压气机工作特性	(78)
3.2.6 失速、堵塞与喘振	(79)
3.2.7 压气机转子结构	(83)
3.2.8 压气机静子结构	(93)
3.2.9 压气机其他部件*	(98)
第 4 章 发动机热端部件原理与结构	(101)
4.1 燃烧室	(101)

4.1.1	基本要求	(101)
4.1.2	燃烧室燃烧过程	(103)
4.1.3	稳定燃烧条件	(104)
4.1.4	基本类型	(110)
4.1.5	环形燃烧室结构	(113)
4.1.6	燃烧室基本构件结构	(116)
4.1.7	燃烧室冷却	(118)
4.1.8	常见故障*	(120)
4.2	涡轮	(121)
4.2.1	分类与组成	(122)
4.2.2	燃气在涡轮中的流动	(124)
4.2.3	性能参数	(125)
4.2.4	涡轮转子连接结构	(127)
4.2.5	工作叶片及其与涡轮盘连接	(130)
4.2.6	静子结构	(134)
4.2.7	涡轮部件冷却	(141)
4.3	排气装置	(145)
4.3.1	亚声速喷管	(146)
4.3.2	超声速喷管*	(148)
4.3.3	排气污染*	(149)
4.3.4	消声	(150)
4.3.5	反推装置	(151)
第5章	涡轮发动机工作特性	(156)
5.1	单转子涡喷发动机共同工作	(156)
5.1.1	单转子涡喷发动机稳态下共同工作	(156)
5.1.2	单转子涡喷发动机过渡态下共同工作	(158)
5.2	单转子涡喷发动机工作特性	(160)
5.2.1	发动机主要工作状态	(160)
5.2.2	单转子涡喷发动机特性	(161)
5.3	双转子涡喷发动机共同工作	(163)
5.3.1	双转子发动机的优点	(163)
5.3.2	双转子涡喷发动机稳态下共同工作	(164)
5.3.3	双转子涡喷发动机过渡态下共同工作*	(164)
5.3.4	双转子涡喷发动机自动调速原理	(166)
5.4	涡扇发动机	(166)
5.4.1	基本参数	(167)
5.4.2	质量附加原理	(168)
5.4.3	涡扇发动机工作特性*	(168)

5.5	涡轮螺旋桨发动机	(170)
5.5.1	螺旋桨*	(171)
5.5.2	涡桨发动机基本参数	(174)
5.5.3	涡桨发动机工作特性	(175)
5.5.4	涡桨发动机的控制*	(175)
5.6	涡轮轴发动机	(177)
5.6.1	涡轴发动机部件特点	(177)
5.6.2	功率匹配和扭矩限制	(178)
5.6.3	涡轮轴发动机工作特性*	(179)
第6章	发动机典型工作系统	(183)
6.1	燃油控制系统	(183)
6.1.1	燃油系统概述	(183)
6.1.2	主要部件	(184)
6.1.3	控制原理与内容	(186)
6.1.4	发动机燃油控制	(188)
6.1.5	监控电子式控制系统	(191)
6.1.6	全功能数字式电子控制系统	(193)
6.2	滑油系统	(196)
6.2.1	概述	(197)
6.2.2	滑油	(197)
6.2.3	系统组成与分类	(198)
6.2.4	CFM56 发动机滑油系统	(206)
6.2.5	滑油维护与监控	(210)
6.3	起动点火系统	(210)
6.3.1	起动过程	(210)
6.3.2	起动机类型	(211)
6.3.3	起动种类与常见故障	(214)
6.3.4	点火系统	(215)
6.4	指示系统	(219)
6.4.1	概述	(219)
6.4.2	主要参数	(219)
6.4.3	告警系统	(227)
6.4.4	电子中央监控系统	(227)
6.4.5	发动机指示及机组告警系统	(228)
第7章	发动机使用与维修	(231)
7.1	发动机使用	(231)
7.1.1	发动机起动	(231)

7.1.2	发动机停车	(231)
7.1.3	发动机试车	(231)
7.2	发动机健康管理	(232)
7.2.1	状态监视	(232)
7.2.2	状态监视软件	(233)
7.2.3	健康管理	(234)
7.3	发动机维修	(234)
7.3.1	维修目的与思想	(234)
7.3.2	维修类型	(235)
7.3.3	维修工作	(235)
7.4	发动机安装与拆卸	(238)
7.4.1	发动机安装节	(238)
7.4.2	发动机拆卸	(238)
7.4.3	发动机安装	(239)
7.5	发动机存储与运输	(239)
7.5.1	发动机存储	(239)
附录 A	典型燃气涡轮发动机的主要参数	(241)
附录 B	AC-66R1-02	(242)
参考文献	(246)

第1章 发动机概述与基础知识

1.1 概述

1.1.1 引言

飞向天空是人类自古以来的梦想，从古到今都是经久不衰的话题。世界上几乎每一个民族都流传着各自的飞天神话和传说，它们寄托着人类共同的美好愿望。

早在两千多年前的楚汉时期，我国就发明了风筝，这是目前世界上公认的、最早的重于空气的飞行器。一千多年前的五代时期发明的“孔明灯”，用于信号联络，这是世界上最早的、最原始的热气球，也是现代热气球的鼻祖。不仅如此，在我国，与之相关的民间神话传说可谓不胜枚举：神话中的嫦娥奔月（见图1-1）；舜受到继母的虐待，要把他烧死，就拿两个“斗笠”从粮仓跳下来逃生，这或许可以看作是降落伞的雏形（见图1-2）。



图1-1 嫦娥奔月



图1-2 舜的“斗笠”

在西方，被后人公认为是世界科学创始人之一的达·芬奇，通过长期观察和研究鸟类的飞行，初步尝试应用一些飞行的基本原理，设计和制作了很多扑翼机原型，如图1-3所示是达·芬奇在1490年设计的“扑翼机”。但是他让他的马车夫去试飞他制作的“扑翼机”，飞起之后人被摔了下来，摔断了一条腿，这说明单靠人力来飞行是不可行的。

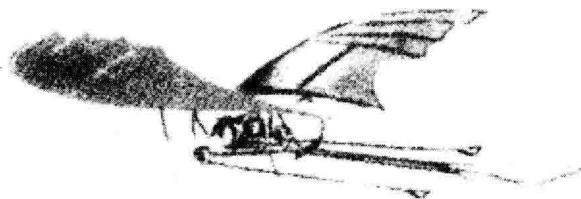


图1-3 达·芬奇笔下的“扑翼机”

由于没有后续的动力,在人类一次次飞行失败之后,飞行便转向借助于轻于空气的航空器,如气球、飞艇和无动力的滑翔机。经过长期的探索和不懈的追求,人类终于发现实现飞上天有三种基本途径:

①基于阿基米德原理,利用轻于空气的飞行器飞行,包括热气球、氢气球、氦气球和飞艇等;

②基于直接有升力的飞行,如火箭、垂直起落的飞机;

③基于伯努利原理,以速度换取升力的飞行,这就需要动力,如固定翼飞机、直升机、旋翼机。

1.1.2 发动机发展历程

由于能够产生持续的动力,发动机的迅猛发展实现了人类希望航空器有动力、载人、持续、稳定、可操作和重于空气飞行的梦想。

从莱特兄弟首次飞行到第二次世界大战结束,所有类型的飞机(军用的和民用的)实际上只有一种动力装置——带螺旋桨的活塞发动机。到20世纪40年代初期,经过不断改进,活塞发动机在功率和经济性方面达到了很高的水平。然而,由于受螺旋桨推进效率的限制,飞机的飞行速度提高不大,始终不能突破声速。

20世纪30年代末期,英国的惠特尔和德国的奥海因分别研制成功离心式涡轮喷气发动机WU和He-S3B;40年代初,德国设计制造出轴流式压气机的涡轮喷气发动机BMW300,随后美国和苏联相继研制出各自的涡喷发动机J47和RD45,为飞机飞行突破声障提供了动力。

20世纪50年代,喷气发动机技术逐渐成熟,开始取代活塞发动机,喷气发动机在发展初期,压气机既有轴流式,又有离心式。为了克服涡喷发动机耗油率高的缺点,发展了耗油率较低的涡轮螺旋桨发动机,简称涡桨发动机。

20世纪60年代初,研发出来的低涵道比(1.5~2.5)涡轮风扇发动机(简称涡扇发动机),耗油率为 $0.07 \sim 0.08 \text{ kg}/(\text{daN} \cdot \text{h})$,逐步代替了耗油率高、经济性差的涡喷发动机。

20世纪70年代,第一代推力在20000daN以上的高涵道比(4~6)涡扇发动机投入使用,开创了大型宽体客机的新时代。

20世纪90年代中期,装备波音777投入使用的第二代高涵道比(6~9)涡扇发动机的推力超过35000daN,通用电气公司的GE90-115B在2003年2月创造了56900daN的发动机推力世界纪录。

目前,普惠公司正在研制新一代齿轮传动涡扇发动机PW8000,其推力为11000~16000daN,涵道比达到11,燃油消耗率下降9%。

1.1.3 发动机的作用与要求

评定航空燃气涡轮发动机品质的主要指标有性能参数与可靠性、耐久性等。性能参数中最重要的有推重比(发动机推力与发动机重量^①之比值)与耗油率两项。对于民用飞机所装备的发动机,要求有高的推重比,低的耗油率,高的可靠性与耐久性,低廉的维修成本,长

^① 本书所提“重量”均为“质量”概念。

的使用寿命，高的使用率与飞行安全等。大量的实践证明不同类型的燃气涡轮发动机能满足这些性能要求：

- ①起飞推力和推重比要求；
- ②巡航耗油率尽可能低；
- ③发动机结构尺寸要小，安装方便；
- ④具备良好的可靠性、较长的寿命和良好的可达性；
- ⑤污染物排放满足机场当地环境保护部门的规定；
- ⑥噪声满足国际民航组织（International Civil Aviation Organization, ICAO）的规定。

从以上条件可以看出，民机或军机发动机要同时达到以上指标是极其困难的，有的甚至是矛盾的。如提高发动机推力必然会使发动机的质量、结构尺寸增加；如提高发动机的速度性能就会使得发动机的经济性变差。通常发动机厂商针对发动机应用的领域及其特点，适当侧重，从而使发动机的综合性能得到优化。

1.2 发动机典型类型与特点

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、涡轮螺旋桨发动机与涡轮轴发动机，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、燃烧室以及驱动压气机的涡轮，因此这类发动机统称为涡轮发动机，作为飞行器的动力装置则称为航空燃气涡轮发动机。

1.2.1 涡轮喷气发动机

依据压气机类型的不同，涡轮喷气发动机可分为轴流压气机式涡轮喷气发动机（见图1-4）和离心压气机式涡轮喷气发动机（见图1-5）。

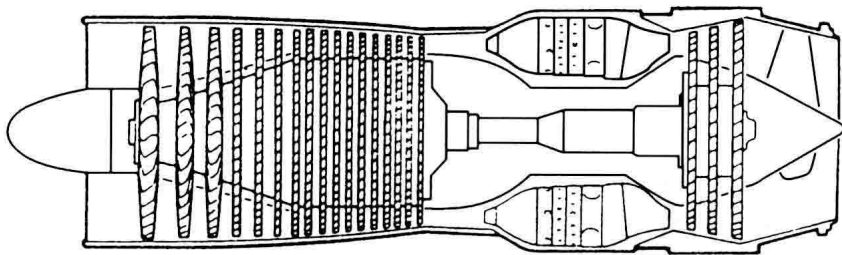


图1-4 轴流压气机式涡轮喷气发动机

燃气涡轮喷气发动机以空气作为工质。进气道将所需的外界空气以最小的流动损失顺利地引入压气机，压气机通过高速旋转的叶片对空气做功压缩空气，提高空气的压力，高压空气在燃烧室内和燃油混合、燃烧，将化学能转变为热能，形成高温高压的燃气，燃气首先在涡轮内膨胀，将燃气的部分焓转变为机械能，推动涡轮旋转，去带动压气机，然后，燃气在喷管内继续膨胀，加速燃气，提高燃气的速度，使燃气以较高的速度喷出，产生推力。

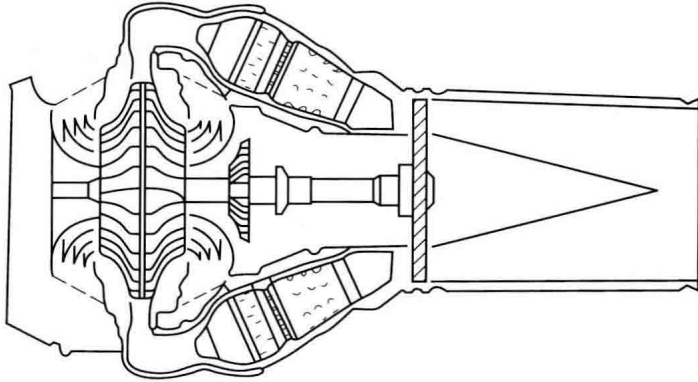


图 1-5 离心压气机式涡轮喷气发动机

航空燃气涡轮喷气发动机是一种热机，将燃油燃烧释放出的热能转变为流经发动机气流的动能。由于气流速度的增加而直接产生反作用推力，因此，这种发动机既是热机又是推进器。

与航空活塞发动机相比，航空燃气涡轮喷气发动机结构简单，重量轻，推力大，推进效率高，而且在很大的飞行速度范围内，发动机的推力随飞行速度的增加而增加，然而因其较高的耗油率而逐渐被涡扇发动机所替代。

涡喷发动机是 20 世纪 50—60 年代应用最为广泛的航空燃气涡轮发动机，今天仍然是航空飞行器的一种重要的发动机。

1.2.2 涡轮螺旋桨发动机

如图 1-6 所示是涡轮螺旋桨发动机。涡轮螺旋桨发动机由燃气涡轮喷气发动机和螺旋桨组成，在它们之间还安排了一个减速器。

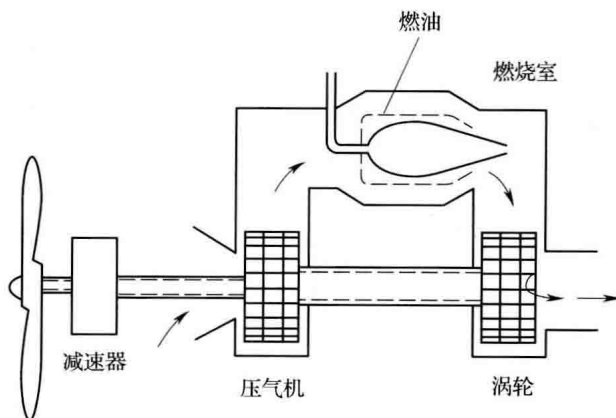


图 1-6 涡轮螺旋桨发动机

空气通过涡轮螺旋桨发动机进气道进入压气机，压气机以高速旋转的叶片对空气做功压缩空气，提高空气的压力。高压空气在燃烧室内和燃油混合、燃烧，将化学能转变为热能，形成高温高压的燃气，燃气在涡轮内膨胀，推动涡轮旋转输出功，去带动压气机和螺旋桨，大量的空气流过旋转的螺旋桨，其速度有一定的增加，使螺旋桨产生相当大的拉力，气体流

过发动机，产生反作用推力。

涡轮螺旋桨发动机综合了涡轮喷气发动机和螺旋桨的优点，而且在较低的飞行速度下，具有较高的推进效率，所以它在亚声速飞行时的经济性较好。目前支线飞机大多装配涡桨发动机。但是，由于有直径较大的螺旋桨，飞行速度受到限制，一般用在马赫数为 0.5 ~ 0.7 的飞机上。另外，由于螺旋桨与减速器的限制，此类发动机功率也不可能太大。

20 世纪 50 年代研制的运输机上采用这种发动机较多，目前支线飞机仍以涡桨发动机作为主要动力装置。

1.2.3 涡轮轴发动机

涡轮轴发动机简称为涡轴发动机，如图 1-7 所示。

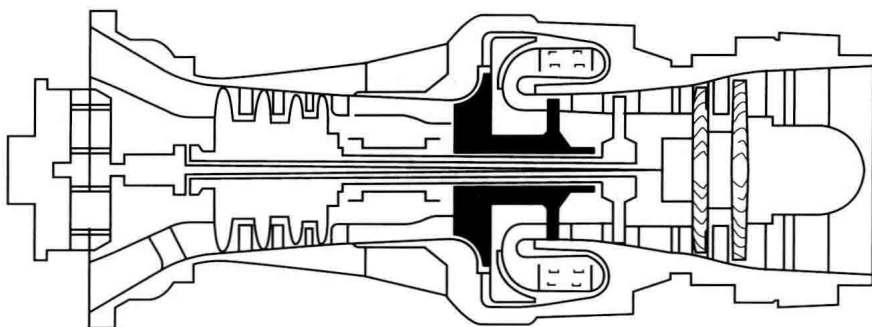


图 1-7 涡轮轴发动机

涡轴发动机是用于直升机上的。在工作和构造上，涡轴发动机基本等同于涡桨发动机，如果燃气发生器后的燃气可用能全部用于驱动动力涡轮而不产生推力，则燃气涡轮发动机就成为涡轮轴发动机，动力涡轮轴上输出的功率可以用来带动直升机的旋翼。燃气发生器排出的燃气能量几乎全部在动力涡轮中膨胀，由尾喷管排出时，气流速度较低。另外，它的输出轴转速较高，以减少由发动机传至直升机主减速器的传动扭矩，使输出轴的直径与重量较小。为此，有的涡轴发动机由动力涡轮轴直接输出功率，有的则装有减速较小的减速器，使输出轴转速高达 6000 ~ 8000 r/min。

国产的直 9 直升机即采用了带减速器的 WZ9 涡轴发动机。涡轴发动机也可以作为非航空领域中的动力。例如，可作为舰船的动力，也可作为地面发电机、油泵、水泵等的工业动力，如图 1-8 所示。

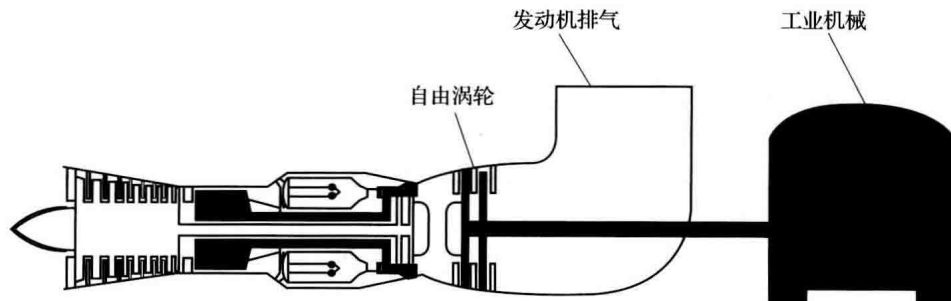


图 1-8 工业用涡轮轴发动机

现代飞机上的辅助动力装置（Auxiliary Power Unit, APU）也是一台小型的燃气涡轮轴发动机，结构简单，功能单一。当主发动机未工作时，它提供飞机电源和气源；当主发动机工作后，可作为飞机的备用电源和气源。

与作为动力用的发动机不同的是，APU 发动机仅稳定工作在一个状态，即恒定的工作转速，如稳定工作转速为 95% 或 100%，其驱动的发电机没有恒速传动装置。

1.2.4 涡轮风扇发动机

图 1-9 所示是涡轮风扇发动机。涡轮风扇发动机由进气道、风扇、低压压气机、高压压气机、燃烧室、高压涡轮、低压涡轮和喷管组成。

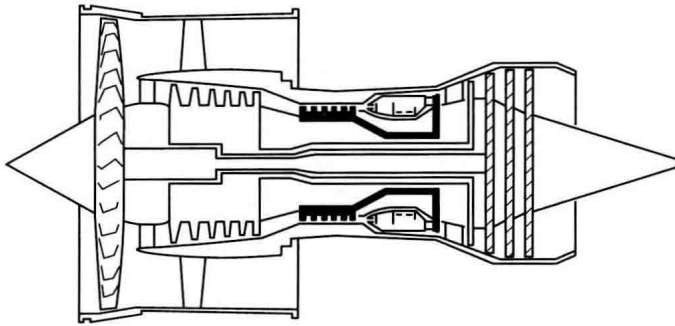


图 1-9 涡轮风扇发动机

涡轮风扇发动机有内外两个涵道，空气经进气道流过风扇后被分为两股：一股进入内涵道，其空气质量流量 $q_{m, I}$ 称为核心发动机的流量，也叫内涵流量；另一股进入外涵道， $q_{m, II}$ 称为外涵流量，又称为附加的推进流量。外涵流量与内涵流量之比称为涵道比。涵道比小于 1 定义为小涵道比，大于 4 为大涵道比，大于 1 而小于 4 为中涵道比。涵道比是涡扇发动机重要设计参数，它对发动机耗油率和推重比有很大影响。不同用途的涡扇发动机应选取不同的涵道比，如远程运输机和民航客机使用的大涵道比涡扇发动机，其涵道比为 4~8。空军战斗机选用的加力涡扇发动机的涵道比一般小于 1，甚至可小到 0.2~0.3。

涡扇发动机内涵的工作情形与涡喷发动机相同，即流入内涵的空气通过高速旋转的风扇、低压压气机和高压压气机对空气做功，压缩空气，提高空气的压力。高压空气在燃烧室内和燃油混合、燃烧，将化学能转变为热能，形成高温高压的燃气。高温高压燃气首先在高压涡轮内膨胀，推动高压涡轮旋转，去带动高压压气机，然后在低压涡轮内膨胀，推动低压涡轮旋转，去带动低压压气机和风扇，最后燃气通过喷管排入大气产生反作用推力。流过外涵的空气通过高速旋转的风扇叶片对空气做功，压缩空气，提高空气的压力和温度，接着空气在通道内膨胀加速，排入大气，也产生反作用推力。

由此可以看出，涡扇发动机的推力等于内涵推力与外涵推力之和。外涵推力占总推力的比例与涵道比有关，涵道比越大，外涵推力占的比例越多，涵道比为 4 时，外涵推力约占总推力的 80%。

与涡喷发动机相比，涡扇发动机具有推力大，推进效率高，噪声低，在一定的飞行速度范围内燃油消耗率低等优点。但涡扇发动机结构复杂，速度特性差。目前民航干线飞机大多装配涡扇发动机。

1.2.5 涡桨风扇发动机

目前一种新型民航动力——涡桨风扇发动机（简称桨扇发动机）已经问世，如图1-10所示。“桨扇”是由螺旋桨与高涵道比风扇衍生出来的先进推进器，标准型桨扇发动机与涡轮螺旋桨发动机类似，由桨扇、减速器和核心机三部分组成，兼有涡桨和涡扇发动机的优点。

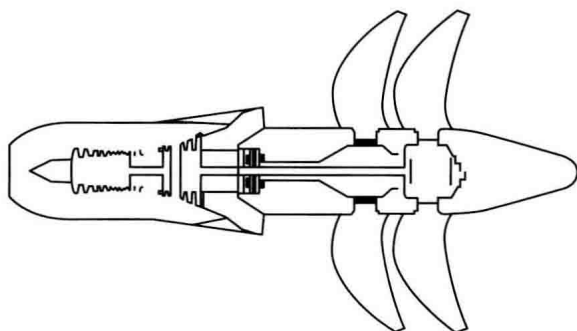


图1-10 桨扇发动机

据美国普惠公司的资料显示，该公司从20世纪50年代发展的JT3C涡喷发动机到20世纪80年代后期发展的PW4000发动机，耗油率约降低了40%，而由PW4000发动机到先进桨扇发动机，耗油率又可降低40%。又据美国通用电气公司报导，该公司研制的并已于1986年开始进行试车的UDF发动机，耗油率比该公司的CFM56-5发动机低25%。桨扇发动机采用了宽弦长、大后掠的多片桨叶，不仅缩小了桨叶直径，而且也提高了在大飞行马赫数下的巡航效率。例如，常规螺旋桨发动机的巡航马赫数不超过0.6~0.7，而桨扇发动机在马赫数为0.8~0.85时仍有较高的螺旋桨效率。

但是，桨扇发动机由于转速较高，产生的振动和噪声也较大，对舒适性有严格要求的民航机来讲是一个难题。另外，暴露在空气中的螺旋桨—风扇的气动设计也是目前研究的难点所在。

1.3 发动机组成和基本工作

1.3.1 涡轮发动机组成

单转子涡轮喷气发动机由进气道、压气机、燃烧室、涡轮和喷管等部件组成，如图1-11所示，图中画出了气体流过发动机时参数的变化情况。

其中，压气机、燃烧室和涡轮是产生燃气的地方，称为燃气发生器，也是各种发动机的核心，所以又称为核心机。气体流过涡轮发动机的各个部件，气体参数发生变化，最终产生推力，则称为涡轮发动机工作原理。

为了表示方便起见，在图1-11上标识了单转子燃气涡轮发动机的站位规定。

0 站位：发动机远前方；

1' 站位：进气道出口，压气机进口；