

现代民用航空 燃气涡轮发动机

● 赵洪利 编著



中国民航出版社

现代民用航空燃气涡轮发动机

赵洪利 编著

中国民航出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

现代民用航空燃气涡轮发动机/赵洪利编著. —北京: 中国民航出版社, 2010. 6
ISBN 978-7-80110-985-9

I. ①现… II. ①赵… III. ①民用飞机 - 航空发动机 - 燃气轮机 IV. ①V235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 109623 号

责任编辑: 姚祖梁 李婷婷

现代民用航空燃气涡轮发动机

赵洪利 编著

出版 中国民航出版社
地址 北京市朝阳区光熙门北里甲 31 号楼 (100028)
排版 中国民航出版社照排室
印刷 北京金吉士印刷有限责任公司
发行 中国民航出版社 (010) 64297307 64290477
开本 787 × 1092 1/16
印张 22.5
字数 506 千字
印数 1000 册
版本 2010 年 10 月第 1 版 2010 年 10 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-80110-985-9
定价 52.00 元

(如有印装错误, 本社负责调换)

前 言

发动机系统是民用航空发动机维修技术人员需要深刻了解的内容，各系统是发动机日常维护的重要内容。一直以来想写一本适合于从事民用航空工作的技术人员、维护人员和学生的关于燃气涡轮发动机的书，以求突出民航特点。

本书详细介绍了航空发动机各系统的组成、功用、工作原理、最新技术、维护特点和维护中容易出现的问题，力求联系实际，为读者实际工作提供参考。本书在介绍发动机原理时力求简洁明了，突出各部件的工作原理和各部件对发动机性能的影响，以及工作中各部件容易出现的问题，以便读者在实际工作中能应用这些知识来分析判断发动机的性能问题和故障问题，解决工作中遇到的实际问题。本书可作为民航院校学生的教材和参与民航维护工作的技术人员系统地学习航空燃气涡轮发动机的参考用书。

本书在编写过程中，借鉴了罗·罗公司、通用电气公司、波音公司和空客公司培训手册和飞机维护手册中的相关资料。

由于编者学术水平有限，书中难免有不当之处，敬请读者提出宝贵意见。

在本书的编写过程中，中国民航－罗·罗公司培训中心的陈玉宝经理给予了极大的帮助，在此表示衷心的感谢。

目 录

前言

第一章 燃气涡轮喷气发动机概述	(1)
第一节 喷气推进发动机的类型	(1)
第二节 燃气涡轮喷气发动机的基本工作原理	(9)
第三节 涡轮喷气发动机的基本结构	(14)
第二章 压气机	(30)
第一节 概述	(30)
第二节 轴流式压气机的基本原理和构造	(32)
第三节 轴流式压气机的气流控制系统	(65)
第四节 离心式压气机	(73)
第三章 燃烧室	(76)
第一节 燃烧室工作原理	(76)
第二节 燃烧室结构	(80)
第三节 燃烧排放	(99)
第四章 涡轮	(101)
第一节 概述	(101)
第二节 燃气在涡轮中的膨胀做功原理	(103)
第三节 涡轮结构	(107)
第四节 涡轮冷却	(127)
第五章 排气系统	(132)
第一节 排气系统的基本结构	(132)
第二节 反推系统	(135)
第三节 消音措施	(149)

第六章 附件传动系统	(152)
第一节 附件传动装置	(152)
第二节 内部齿轮箱	(154)
第三节 外部传动装置	(158)
第七章 滑油系统	(167)
第一节 概述	(167)
第二节 滑油	(168)
第三节 滑油系统的组成和类型	(170)
第四节 典型滑油系统介绍	(185)
第五节 滑油系统维护	(201)
第八章 燃油系统	(203)
第一节 概述	(203)
第二节 燃油控制系统	(209)
第三节 发动机电子控制系统	(216)
第四节 发动机功率	(237)
第九章 起动和点火系统	(240)
第一节 概述	(240)
第二节 起动系统	(241)
第三节 点火系统	(245)
第四节 典型发动机起动点火系统	(249)
第五节 发动机地面运转	(254)
第十章 防冰系统	(259)
第一节 概述	(259)
第二节 涡轮风扇发动机的防冰系统	(260)
第十一章 发动机指示系统	(269)
第一节 概述	(269)
第二节 发动机主要参数的测量	(271)
第三节 ECAM 系统	(285)
第四节 EICAS 系统	(291)
第十二章 发动机振动与配平	(297)
第一节 发动机振动	(297)

第二节 平衡 (301)

第三节 发动机转子配平 (304)

第十三章 推进系统 (313)

第一节 推进系统概述 (313)

第二节 进气道 (319)

第三节 发动机防火系统 (321)

第十四章 发动机维修 (330)

第一节 发动机维修概述 (330)

第二节 MSG-3 (340)

第三节 ETOPS 维护 (345)

第四节 人为因素 (348)

参考文献 (352)

第一章 燃气涡轮喷气发动机概述

第一节 喷气推进发动机的类型

涡轮喷气发动机工作的依据就是喷气推进理论，很早以前人们就发现了这一现象，但真正的涡轮喷气发动机直到 20 世纪 40 年代才被发明出来。涡轮喷气发动机是通过把热能转换为动能，使大量的气体向后移动来产生向前的推力。这一设计的根据是牛顿第三定律，即每一作用力都有一与其大小相等、方向相反的反作用力。对于涡轮喷气发动机来说，这一作用力就是迫使大量气体向后流动而排出发动机的力。空气从发动机进口以一定的速度（取决于发动机向前的移动速度）进入发动机，发动机对气体做功，使它向后流动，并在燃烧室内燃烧，加入热能。之后，气体以更大的速度从发动机出口排出。而这一喷气的反作用力则作用在发动机上，再由发动机传给飞机，使飞机向前运动。推力的大小取决于流过发动机的气体流量和对气体加速的大小。

图 1.1 为喷气推进示意图，一定量的空气以速度 v_1 进入发动机，以更高的速度 v_2 从发动机中喷出，也就是说气体流过发动机产生了加速度。根据牛顿第二定律，任何物体产生了加速度，就一定有外力作用在这个物体上。这就是说，在发动机内部给气体施加了一个向后的作用力，而这一作用力的反作用力就是发动机所产生的推力。反作用力并非作用在发动机出口截面的气体上，而是作用在发动机内表面和内部各部件上。

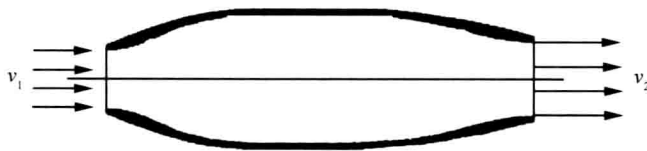


图 1.1 喷气推进示意图

喷气推进发动机有很多种类型，如火箭、脉冲喷气发动机、涡轮喷气发动机和涡轮风扇发动机等。除火箭外，所有这些发动机，都需要从大气中吸入大量的空气，然后加入燃油燃烧。加热后，气体膨胀扩张，从发动机后部排出。加热后的气体（燃气）的热能很高，发动机类型不同，对燃气的热能利用也不同，涡轮喷气发动机是利用涡轮从燃气中提取部分能量，把它转化为机械能来驱动压气机或风扇的。

一、火箭

火箭是最古老的喷气动力装置，我国古代就有发明利用。它结构简单，可用金属甚至纸做的一根管子，里面装满固体燃料，如火药或液体燃料（如酒精和液氧）。燃料燃烧后产生的燃气从尾喷管中以高速喷出，产生推力。现代火箭可用于导弹发射和宇航飞行。其尾喷管一般为收敛 - 扩张形，这样可得到很高的喷气速度。图 1.2 为液体火箭示意图，火箭内有两个容器，分别装有液氧和另外一种液体燃料。用泵把液氧和燃料供到燃烧室，在那里混合燃烧，产生的燃气从尾部的收敛 - 扩张形喷管中喷出。液体火箭发动机的工作时间长，推力大小可以调节，是宇宙航行的主要动力装置。固体燃料火箭发动机结构简单，制造方便，能产生巨大的推力，但它的工作时间短，并且不容易控制。

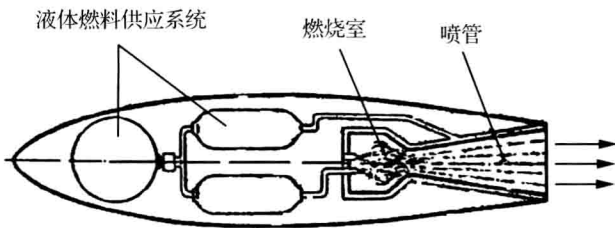


图 1.2 液体火箭

二、冲压喷气发动机

冲压喷气发动机是最简单的喷气发动机。它由进气道、燃烧室和喷管组成，内部不含任何转动部件。进气道为扩张形，喷管是收敛形或收敛 - 扩张形。进来的气体在进气道内降速增压，之后在燃烧室内与燃料混合，在等压的条件下连续燃烧，产生的高温、高压燃气在喷管中膨胀加速后喷出，产生推力，见图 1.3。这种发动机要想工作，首先需要获得很高的前行速度，一般速度要大于 400 公里/小时，只有这样才能保证燃烧室内气体的压力足够维持燃烧。所以，冲压发动机需要靠其他移动工具先获得这么高的速度，之后才能开始工作。飞行速度越高，冲压作用越大，产生的推力也就越大，因而它更适合于超音速飞行。也可把它用在涡轮喷气发动机上，装在排气系统中，用作加力燃烧室，来进一步提高喷气速度。

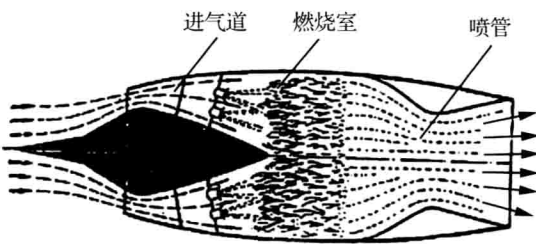


图 1.3 冲压喷气发动机示意图

三、燃气涡轮发动机

用在飞机上的燃气涡轮发动机，一般可分为四种：涡轮喷气发动机、涡轮螺旋桨发

动机、涡轮风扇发动机和涡轮轴发动机。这些发动机都包含下列主要组成部件：压气机、燃烧室、驱动压气机的涡轮以及排气管。但不同类型的发动机对这些部件的布局不同。发动机工作时，压气机吸入空气并压缩，使空气的压力提高；在燃烧室内把燃料混入增压后的空气，并点燃燃烧，产生高压、高温燃气；燃气进入涡轮，涡轮把燃气的部分能量转换为机械能，高速旋转，而涡轮与压气机之间靠轴连接在一起，从而带动压气机旋转；最后燃气在喷管中膨胀加速喷出，产生推力。不同的是，涡轮喷气和涡轮风扇发动机都是靠喷气产生推力；而涡轮螺旋桨发动机则主要靠螺旋桨产生拉力，喷气产生的推力只占很小一部分；涡轮轴发动机不产生喷气推力，燃气的能量基本都被涡轮转换为轴功率了。

1. 涡轮喷气发动机

涡轮喷气或叫纯涡轮喷气发动机，是利用高速喷出的燃气来产生推力。这种发动机是最早的燃气涡轮喷气发动机。但它产生的推力受到发动机尺寸限制，同时噪音也大。所以，在大多数民用飞机上，这种发动机已被涡轮风扇发动机所取代。但它适合于高速飞行的飞机，所以在军用飞机上，它仍然被使用。根据压气机类别的不同，涡轮喷气发动机又可分为轴流压气机式涡轮喷气发动机〔图 1.4 (a)〕和离心压气机式涡轮喷气发动机〔图 1.4 (b)〕。

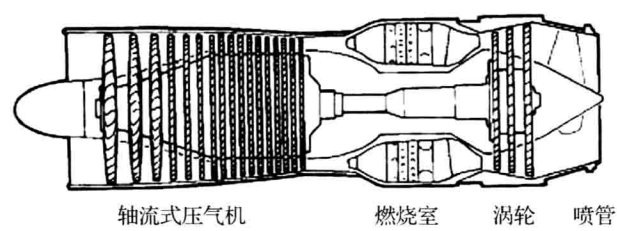


图 1.4 (a) 轴流压气机式涡轮喷气发动机

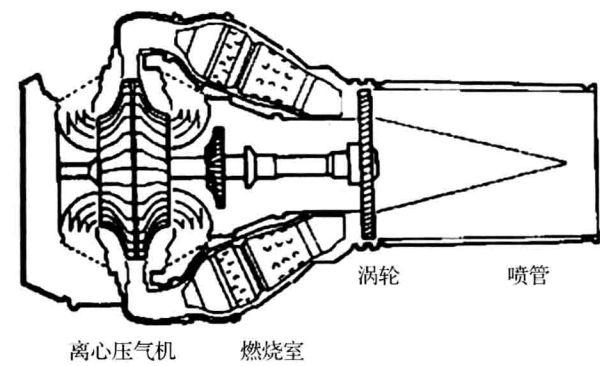


图 1.4 (b) 离心压气机式涡轮喷气发动机

2. 涡轮螺旋桨发动机

在燃气涡轮发动机或涡轮喷气发动机上加一个减速齿轮箱和螺旋桨，就形成涡轮螺旋桨发动机，如图 1.5 所示。这种发动机一般用在飞行速度较低的飞机上（速度为 480 ~ 720 公里/小时），飞行高度一般在 6000 米左右，其燃料消耗水平较低。

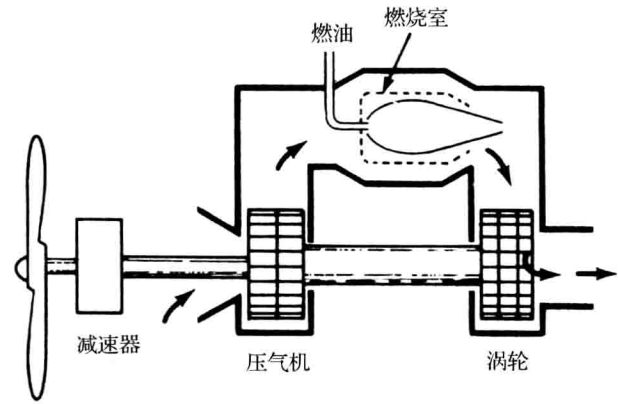


图 1.5 涡轮螺旋桨发动机示意图

其最大区别就在涡轮。在涡轮喷气发动机上，涡轮主要用来驱动压气机和附件系统，涡轮从燃气中提取的能量能驱动压气机和附件就可以了，燃气中剩余的能量用于使燃气在尾喷管中膨胀加速。而在涡轮螺旋桨发动机上，涡轮不仅要驱动压气机和附件，而且还要驱动螺旋桨，并且涡轮的主要作用就是驱动螺旋桨，产生拉力。一般来说，涡轮要把燃气能量的 75% ~ 85% 提取出来用于驱动螺旋桨，而排气产生的推力很小。所以在涡轮螺旋桨发动机上涡轮级数就要多些，且涡轮叶片也要设计成能从燃气中多提取能量的那种叶型。

驱动螺旋桨有不同的方式，从图 1.5 可见，驱动压气机的轴向前传动减速齿轮箱，通过减速齿轮箱把高转速低扭矩转换成低转速高扭矩，然后再驱动螺旋桨；另外一种方式就是自由涡轮（或叫动力涡轮），见图 1.6。

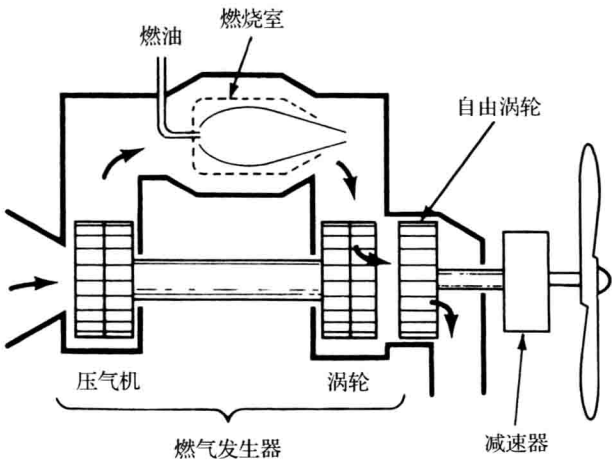


图 1.6 带自由涡轮的涡轮螺旋桨发动机

从图 1.6 可见，自由涡轮与前面驱动压气机的涡轮间没有机械连接，它们之间只是气动配合。自由涡轮只驱动螺旋桨。涡轮螺旋桨发动机的功率一般用轴功率（马力）来衡量，而不是用推力来表达。图 1.7 为 TPE331 涡轮螺旋桨发动机简图，可见压气机轴前伸，驱动减速齿轮系，减速齿轮的输出轴驱动螺旋桨。

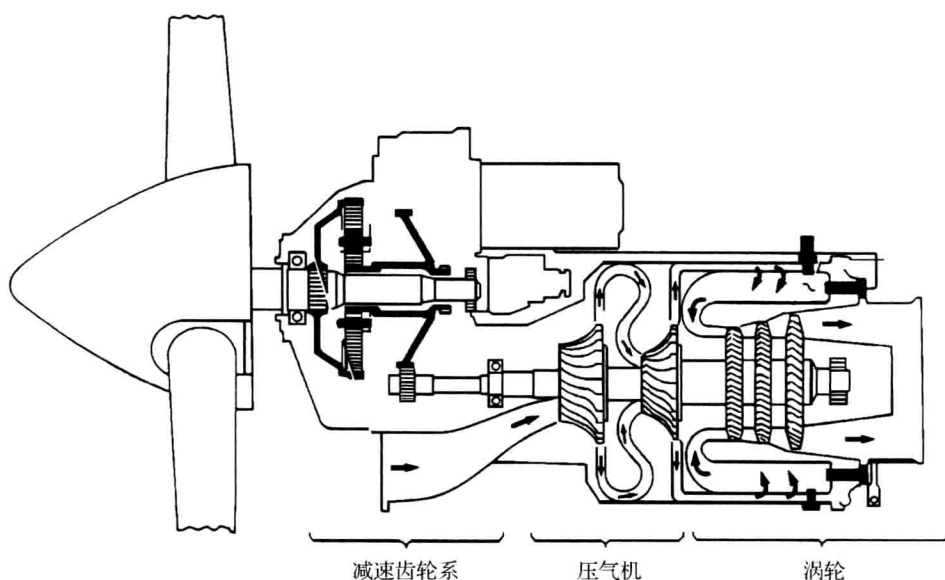


图 1.7 TPE331 涡轮螺旋桨发动机

3. 涡轮风扇发动机

涡轮风扇发动机是介于纯喷气发动机和涡轮螺旋桨发动机之间的发动机。相对于纯涡轮喷气发动机来说，其压缩空气量大，排气速度低些；而相对于涡轮螺旋桨发动机而言，涡扇发动机加速的空气量要少些。风扇发动机有两个涵道，即外涵道和内涵道。外涵道和内涵道空气流量的比值，叫涵道比。按涵道比的大小划分，涡轮风扇发动机可分为低涵道比、中涵道比和高涵道比三种类型。大多数涡轮风扇发动机，都是把风扇放在前面，有的还与低压压气机连在一起（双转子涡轮风扇发动机），有的是风扇单独形成一个压气机，由低压涡轮来驱动，如罗·罗公司的 RB211 系列三转子涡轮风扇发动机，见图 1.8。

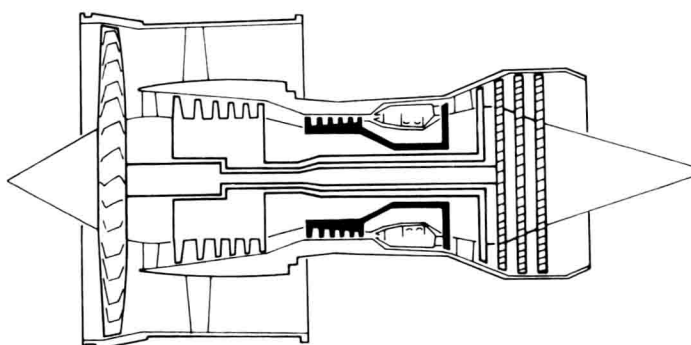


图 1.8 罗·罗公司的 RB211 涡轮风扇发动机

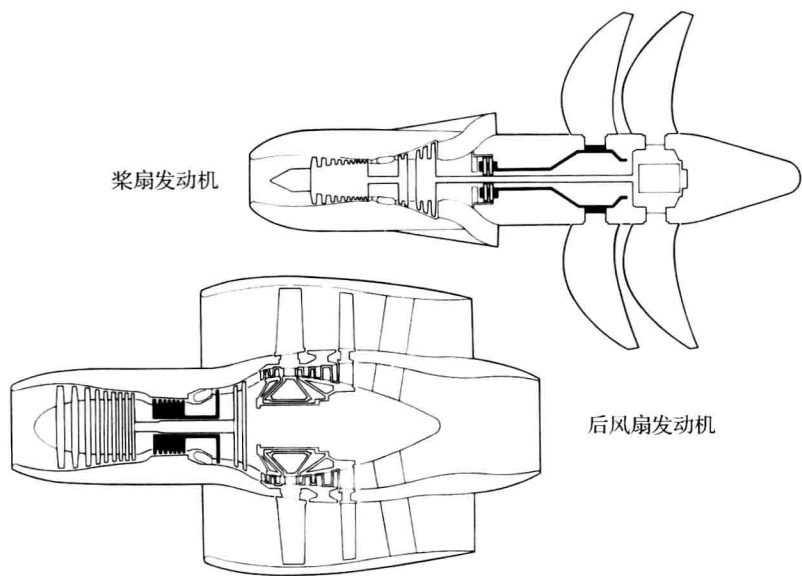


图 1.9 桨扇和后风扇发动机

另外，涡轮风扇发动机还有一种布局，就是把风扇放在后部，见图 1.9。这种结构方案很早就有，但一直未被实际应用。由于后风扇发动机有其独特之处，因此，将来也许会被重新考虑。现代大型民用飞机上的涡轮风扇发动机一般都是高涵道比的，并且为前风扇布局。如罗·罗公司的 RB211 系列涡轮风扇发动机，通用电气公司的 CF6 和 GE90 系列涡轮风扇发动机，普惠公司的 PW4000 系列涡轮风扇发动机和 IAE 公司的 V2500 系列发动机。

对于高涵道比的涡轮风扇发动机而言，75% ~ 80% 以上的推力都是由外涵道产生的，内涵道产生的推力很小。所以，又把内涵部分（包括压气机、燃烧室、涡轮）叫做燃气发生器。其作用就是产生大量燃气，来驱动低压涡轮转动，低压涡轮再驱动风扇。高涵道比的涡轮风扇发动机燃油消耗较低，噪音也小。现在各发动机制造商都在研制高增压比、高涵道比的涡轮风扇发动机，以满足用户对高推力、低燃油消耗和低噪音的要求。如 PW8000 的涵道比为 11，总压比为 40；GE90 发动机的涵道比为 9，总压比约为 40；Genx 的涵道比大约为 9.5，总压比大约在 45 左右；而 TRENT900 发动机的涵道比为 8.5，总压比为 44。但涵道比若太高，会增加发动机的尺寸和重量，其带来的好处会被抵消。根据罗·罗公司的建议，涵道比最大为 10 ~ 11，而美国国家宇航局（NASA）正在探索把涵道比提高到 15。表 1-1 给出了目前典型大型涡轮风扇发动机的一些性能数据。涡轮风扇发动机的另一个发展方向就是对转。即采用两级风扇，但它们的转向相反。通过这一技术可进一步降低油耗和噪音。

齿轮传动的涡轮风扇发动机是另一个发展方向，即在低压涡轮和风扇之间加装减速齿轮系。低压涡轮直接驱动低压压气机，使其在较高的转速下工作，压气机能较好地发

挥其能力。但低压涡轮的转动要经减速齿轮系降速后，再传动风扇，降低风扇的转速，从而可实现既让低压涡轮在其理想的转速下工作，又优化了风扇的转速。根据普惠公司的研究，采用齿轮传动后，可采用更高的涵道比，可进一步降低发动机的燃油消耗、污染排放和噪音水平。但减速齿轮系的传动效率和润滑冷却是关键因素。

桨扇发动机（图 1.9）是在涡轮螺旋桨发动机的基础上演变而来的，它能在高速下飞行，相应的涵道比很高。但目前由于噪音和安全方面的原因，一直没有得到使用。

4. 涡轮轴发动机

涡轮轴发动机（图 1.10）与涡轮螺旋桨发动机类似，只不过它的输出轴不是驱动螺旋桨，而是驱动其他设备。燃气的能量基本都被涡轮吸收了。因此，相对于涡轮喷气发动机而言，其涡轮的级数要多。在航空上，涡轮轴发动机经常用在直升飞机上，用来驱动旋翼，或用作大型飞机上的辅助动力装置（APU），驱动发电机，以及给飞机气源系统供气。

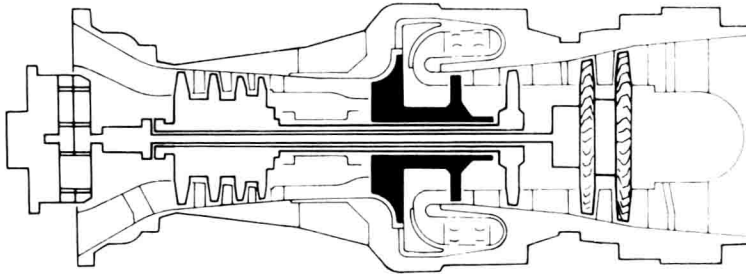


图 1.10 涡轮轴发动机

现在多数的涡轮轴发动机都采用自由涡轮结构（见图 1.10），自由涡轮输出到减速齿轮系，然后再传动其他的设备。

当然，燃气轮机还可用于工业（如驱动大型发电设备、天然气管道压缩机）和舰船动力设备等。工业燃气轮机与航空燃气轮机类似，并且许多工业用燃气轮机就是从航空发动机改型而来的，只不过工业燃气轮机的部件更大、更重些，相应的燃料也可用双燃料：即天然气和燃油。发动机的一些附件系统就可不装在发动机上，而是固定在地面其他部位。

表 1-1 主要现代民用航空涡轮风扇发动机

机型	涵道比	总增压比	推力（磅）	风扇直径（米）	主要应用机型
RB211-535E4	4.4	25.8	40100 ~ 43100	1.882	波音 757-200、-300，图 204
RB211-524B	4.5	28	50000	2.1	L1011
RB211-524D	4.3	30	53000	2.1	空客 340
RB211-524G	4.3	33	59000	2.19	波音 747-400

续表

机型	涵道比	总增压比	推力（磅）	风扇直径（米）	主要应用机型
RB211-524H	4.1	34.5	61000	2.19	波音 747，波音 767
TRENT500	7.5 ~ 7.6	36.6	55000 ~ 62000	2.474	空客 340-500、-600
TRENT700	5	33.7 ~ 35.5	68000 ~ 72000	2.474	空客 330-200、-300
TRENT800	5.7 ~ 6.2	42	75000 ~ 95000	2.794	波音 777-200、-200ER、-300
TRENT900	8.5 ~ 8.7	37 ~ 39	70000 ~ 76500	2.946	空客 380-800、-800F
TRENT1000	10 ~ 11	50	53000 ~ 75000	2.845	波音 787
TRENTXWB	8 ~ 9		75000 ~ 93000	2.997	空客 350XWB
JT9D-7R4	5	22	48000 ~ 56000	2.463	波音 747，波音 767，空客 310
PW2037	5.8	27.6	38250	1.994	波音 757
PW4168	5.34	33.9	68000/72000	2.535	空客 330
PW4000 系列	5.8 ~ 6.4	34.2 ~ 42.8	74000 ~ 98000	2.845	
主要包括	PW4084				波音 777
	PW4090				波音 777-200ER
	PW4098				波音 777-200ER，波音 777-300
PW6000	4.9	26.6 ~ 28.7	18000 ~ 24000	1.435	空客 318
PW600	2.8		900 ~ 3000	0.368 ~ 0.447	Embarer Phenom100，赛斯纳 Citation
PW500	4.12	15.49	2900 ~ 4500	0.5842 ~ 0.6934	赛斯纳 Citation 和 Embarer Phenom300
PW300	4.24	20.58	4700 ~ 7000	最大 0.818	庞巴迪 Learjet60，湾流 G200
GP7270	8.7	43.9	70000	2960	空客 380 客机
GP7277	8.7	45.7	77000	2960	空客 380 货机
GE90-94B	8.4	40	93700	3.124	波音 777-200ER
GE90-115B	7	42	115540	3.251	波音 777-300ER、-200LR
Genx	9.5	41	53000 ~ 75000	3.66	波音 787，波音 747-8
CF6-80C2	5.05	30.4 ~ 32.7	48000	2.362	波音 767、747，空客 300、310
CF6-80E1	5.28	32 ~ 34.6	64000 ~ 68000	2.438	空客 330
CFM56-2	5.9 ~ 6	30.5 ~ 31.8	24000	1.734	麦道 DC-8 系列
CFM56-3	5.9 ~ 6	27.5 ~ 30.6	18500 ~ 23500	1.524	波音 737-300、-400、-500
CFM56-5	5.4 ~ 6.6	31.3 ~ 38.3	22000 ~ 34000	1.734	波音 737-300、-400、-500，空客 340-200、-300，319，320 和 321
CFM56-7	5.1 ~ 5.5	32.8	19500 ~ 27300	1.549	波音 737-600、-700、-800、-900
V2500-A1	5.4	29.4	25000	1.6	空客 320
V2500-A5	4.5 ~ 4.9	27.7 ~ 31.4	22000 ~ 33000	1.61	空客 320，321，319
V2500-D5	4.8/4.7	27.7/30.4	25000/28000	1.61	波音 MD90
AE3007A	5.15	22	7000 ~ 8000	0.98	ERJ145

注：推力为海平面高度下的最大额定推力。

第二节 燃气涡轮喷气发动机的基本工作原理

一、燃气涡轮喷气发动机的工作循环

燃气涡轮喷气发动机也是一种热机，像活塞式发动机一样，它也要吸入空气（靠进气道），压缩空气（由压气机来完成），然后再加入热能（在燃烧室内加油燃烧），做功（涡轮把部分能量转换为机械能），最后再把燃气排出（尾喷管）。与活塞发动机不同的是，这些过程是在发动机内部连续不断进行的，即空气连续进入，不断被压缩，燃烧，做功和排气；而在活塞发动机上这些过程是间歇的，它只有把燃烧后的气体排出后，才能再吸入新的空气。

活塞式发动机的循环是定容循环，即在燃烧的瞬间，容积是不变的，也叫奥托循环。图 1.11 为活塞式发动机工作循环的压 - 容图。

燃气涡轮发动机的循环为布莱顿循环，即气体压缩后加入热能时（加入燃油燃烧），压力保持不变，所以也叫定压循环，如图 1.12 所示。

图 1.12 中，点 1 代表空气进入发动机之前的状态，即还没进入发动机的进气道。当空气进入进气道后，空气要稍微扩张，其静压升高，图中为 1 到 2 段。从点 2 开始，空气进入压气机，即点 2 代表压气机进口。2 到 3 这段表示空气在压气机内的压缩过程。压气机对气体做功，使气体的压力升高，容积减小。压缩得越厉害，发动机的热效率越高。现代涡轮发动机的热效率可达

45% 左右。点 3 代表加入燃油并点燃，3 到 4 段代表空气在燃烧室内的燃烧过程。在这一过程中，温度升高，压力基本不变，体积迅速增大。实际上由于燃烧室的结构，气体在燃烧室内流动过程中要有损失，压力稍有下降。点 4 代表燃气进入涡轮，4 到 5 段代

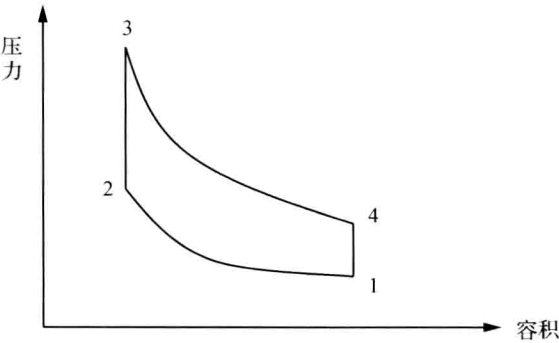


图 1.11 定容循环

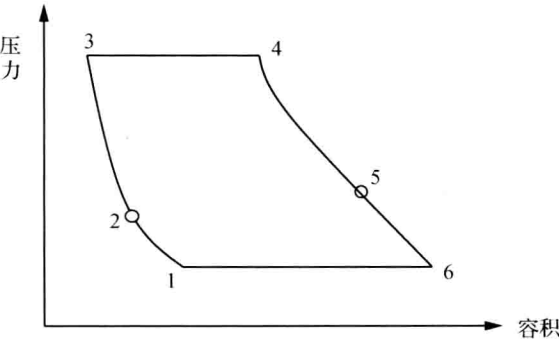


图 1.12 定压循环

表燃气在涡轮中的膨胀过程。5 到 6 段代表气体在喷管中的膨胀。在整个膨胀过程中，涡轮要从燃气中提取部分能量，剩下的热能一部分转化为动能，使燃气高速喷出，还有一部分热能随燃气排掉。在这一过程中，压力、温度下降，体积不断增加。6 到 1 段反映了燃气在大气中降温过程。

二、气体流动过程

气体在涡轮发动机内部流动过程中，其压力、温度、体积和速度都要发生变化。根据空气动力学，气体在以亚音速流动过程中要遵守伯努力定律，即当气体或液体以一定的流量在管道内流动时，其压力势能和动能的和保持不变，可用式（1-1）来表示：

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{常数}$$

(1-1)

式中， p ——气体静压；
 v ——流动速度；
 ρ ——气体密度。

这就是说，在流动过程中，若速度下降了，则压力升高；而反过来，若压力下降了，则速度增加，总压不变。图 1.13 解释了气体流动过程中压力和速度的变化关系。



图 1.13 气体流动过程中压力和速度的变化关系

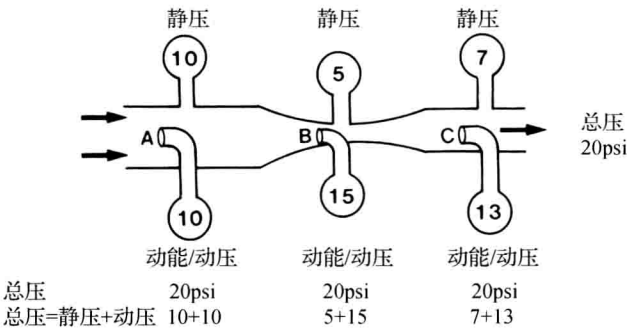


图 1.14 气体在收敛 - 扩张通道中的流动过程