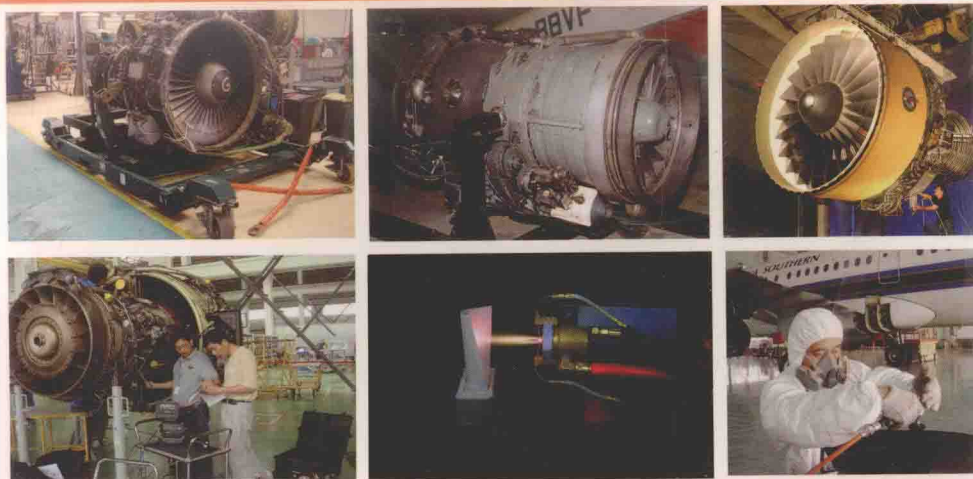




普通高等院校民航
特色专业统编教材

机务专业高职适用



航空燃气涡轮发动机 维修与实训

Aviation Gas Turbine Engine Maintenance,
Repair & Partical Training

© 汤天明 主编



中国民航出版社



普通高等院校民航特色专业统编教材·机务专业高职适用

航空燃气涡轮发动机维修与实训

汤天明 主编

中国民航出版社

.....

图书在版编目 (CIP) 数据

航空燃气涡轮发动机维修与实训/汤天明主编. —
北京: 中国民航出版社, 2015. 7
ISBN 978-7-5128-0267-4

I. ①航… II. ①汤… III. ①航空发动机-涡轮喷气
发动机-维修 IV. ①V235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 154184 号

航空燃气涡轮发动机维修与实训

汤天明 主编

责任编辑 刘庆胜 杨玉芹
出 版 中国民航出版社 (010) 64279457
地 址 北京市朝阳区光熙门北里甲 31 号楼 (100028)
排 版 中国民航出版社录排室
印 刷 北京华正印刷有限公司
发 行 中国民航出版社 (010) 64297307 64290477
开 本 787 × 1092 1/16
印 张 25.75
字 数 582 千字
版 印 次 2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5128-0267-4

定 价 64.00 元

官方微博: <http://weibo.com/phcaac>

淘宝网店: <http://shop106992650.taobao.com>

E-mail: phcaac@sina.com

民航特色专业统编教材编写委员会

主任委员：周来振

副主任委员：任英利 刘金波 刘 锋 胡振江
杨楨梅 佟岱山 张瑞庆 张晓军
李其国 于 剑 陈布科 闫植林
黄永宁 于 再 刘树国 王永亮

委 员：赵洪海 胡 嘉 苏 红 齐 纲
张 森 张 锐 郭 静 王立军
詹建明 韩 雁 何秋钊 耿 杰
史晓强 陆 周 李 梅 王成华

出版前言

当前,我国民航事业呈现快速发展态势,人才需求巨大,人才缺口矛盾突出。为深入实施“科教兴业”和“人才强业”战略,进一步加快民航专业人才培养,提高人才培养质量,努力为推动民航强国建设提供更加强有力的人才保障,在院校教育方面必须十分注重教学基本建设,编写民航统编教材便是其中的一项重要工作。

民航局高度重视统编教材编写工作,自2012年首次推出“空管专业统编教材”以来,其他特色专业教材也得到了系统开发,此次机务专业统编教材的编写出版就是在民航局高度重视下取得的又一成果。

本套教材在编写过程中紧密结合民航机务专业本科和高职人才培养目标的不同要求,在教材编写上各有侧重:机务专业高职教材在编写原则上贯彻以学生为主体的教学思想,理论知识以“必需”和“够用”为度,重点突出实际操作技能;机务专业本科教材在编写原则上是从培养民航高级机务维修和管理人才的目标出发,注重学生理论素养的提升,尽可能吸收民航发展的最新技术和成果。同时,为保证教材的实用性、先进性,并能反映维修过程中的技术水平,本套教材的开发、编写由来自中国民航大学、中国民航飞行学院、中国民航管理干部学院、广州民航职业技术学院、上海民航职业技术学院的机务专业教师与来自中国国际航空股份有限公司、中国东方航空股份有限公司、中国南方航空股份有限公司等企业的专业人员共同完成,使教材内容更具有针对性,更加贴近社会需要和岗位需求标准。

本套教材秉承民航特色专业统编教材的编撰宗旨,在内容、体例、规范等方面更加严谨、务实,编者多是长期从事机务专业教学和研究工作的资深教师及富有飞机维修经验的一线专业人员,书稿中的重要内容均经过行业专家审核把关。该套丛书体现了权威、创新、普适的特点,丰富、更新并完善了近年来机务专业的教材体系,既适合民航大中专院校、社会上各类机务培训机构用作教材,也可作为民航一线维修人员拓展知识、提高实操能力的培训用书。

此次机务专业统编教材的组织编写专业细分性较强,涉及面广,不足之处在所难免,诚恳地欢迎大家在教材使用过程中提出改进意见,使统编教材日臻完善。

中国民航出版社
2015年6月

前 言

进入 21 世纪以来,随着我国经济的快速发展,民用航空运输业蓬勃发展,国内各航空公司的飞机数量不断增加,新航空公司、新航空港或新机场不断涌现。与此同时,随着我国航空运输市场的不断开放,国外一些知名的航空公司、飞机或发动机维修公司也纷纷进入我国民用航空运输、民航飞机维修及发动机维修市场。民用航空运输业和民航维修业对技能型维护及维修专业人才的需求与日俱增。

近年来,飞机与发动机的设计理念、制造工艺和新材料技术日新月异,数字化、信息化、模块化和自动化等技术在航空器上的应用越来越广泛。动态监控、远程监控、后台支援、网络化监控和计算机辅助维修等全新的维修理念和技术在 A380、B787 等新型大飞机上被普遍采用。这些新技术大大提高了航空器及发动机故障诊断的准确性、维修工作效率,而且降低了飞机的运营成本。

航空发动机常被称为航空器的“心脏”,发动机能否正常工作或者运行是航空器安全飞行的一个决定性因素。航空发动机维修是航空器维修工作的一个重要组成部分,其最终目的就是保持或者恢复航空发动机的设计工作状态或者可靠性水平。

为了规范和完善飞机机电维修专业和发动机维修专业的航空燃气涡轮发动机维修与实训教学课程内容,特编写了本教材。本教材适用于民航大中专或者高职院校的飞机机电维修专业、发动机维修专业或者其他相近专业的维修实训或实习教学,也可供其他院校和航空维修培训机构的相同或相近专业实训教学时参考。

本书第 1 章是航空燃气涡轮发动机分类、检验与维修介绍;第 2 章介绍航空燃气涡轮发动机的常用修理工艺;第 3 章介绍发动机主要部件的构造、工作原理、常用检验方法和维修维护内容;第 4 章至第 9 章介绍航空燃气涡轮发动机主要系统与附件、检验排故、典型的维修实训项目和操作程序等内容;第 10 章专门介绍飞机辅助动力装置的构造、检验排故、典型的维修实训项目和操作程序;第 11 章介绍发动机维修的基本常识、标准操作或者施工方法。在掌握发动机及其系统基本构造知识的基础上,通过大量的实训操作,能够培养学生树立正确的维修理念,使学生逐步掌握民用航空器维修工作中的基本安全常识、标准维修操作规范和维修工作基本技能等。

鉴于 B737-300/400/500 飞机基本上逐渐进入了退役期,未来几年可能会有较多的 B737-300/400/500 飞机和 CFM56-3 发动机进入民航院校和其他飞机维修培训机构,同时也考虑到不同院校的教学资源差异,本教材以高涵道比、轴流式和双转子涡轮风扇发动机 CFM56-3 发动机为主线展开,兼顾 PW4000 和低涵道比的斯贝 512-5 W 等其他型号

发动机。各章实训项目操作程序尽可能覆盖到不同发动机的相同功能零部件的维护维修技术或者维修工艺方面的共性，也尽可能贴近当前航空发动机的维修技术现状和发展趋势。而目前民用航空业较少采用的涡轮螺旋桨发动机、涡轮轴发动机的特有部件如螺旋桨、减速器等的维修维护内容则未涉及。

本教材第1章、第2章、第3章、第5章、第6章、第10章和第11章由汤天明编写，第4章、第7章、第8章、第9章由冯铭编写。由于时间和编者水平有限，书中不当或者遗漏之处在所难免。希望本教材能起到抛砖引玉的作用，期待今后能有更多的民用航空器和发动机维修实训类教材面世。真诚地希望读者多提宝贵建议，便于编者在未来修订时进一步完善教材内容。

编 者

2015年5月于广州

目 录

出版前言

前言

第 1 章 航空燃气涡轮发动机及维修简介	1
1.1 航空燃气涡轮发动机简介	1
1.2 斯贝、CFM56 和 PW4000 发动机介绍	9
1.3 航空燃气涡轮发动机检验和维修常用术语	17
1.4 航空燃气涡轮发动机检验介绍	20
1.5 航空燃气涡轮发动机维修简介	28
第 2 章 航空燃气涡轮发动机维修工艺	43
2.1 金属切削加工	44
2.2 钳工	50
2.3 焊接	52
2.4 喷丸强化	62
2.5 热喷涂工艺	65
2.6 电镀工艺	70
2.7 电火花加工	71
2.8 激光加工	73
2.9 金属热处理	74
2.10 阳极化工艺	77
2.11 粘接、封严和填充工艺	78
2.12 CFM56 发动机大修的主要项目介绍	78
第 3 章 航空燃气涡轮发动机部件检验与维修	84
3.1 航空燃气涡轮发动机部件	84
3.2 燃气涡轮发动机部件介绍	85

3.3	燃气涡轮发动机部件检验和维修	107
3.4	燃气涡轮发动机部件的检验、拆装和维修操作程序	124
第4章	航空燃气涡轮发动机燃油系统	167
4.1	发动机燃油系统简介	167
4.2	燃油系统主要零部件介绍	169
4.3	燃油系统安全操作要求、检验和排故	174
4.4	燃油系统典型零部件的拆装、检验、修理和测试操作程序	176
第5章	航空燃气涡轮发动机点火系统	195
5.1	航空燃气涡轮发动机点火系统简介	195
5.2	点火系统主要部件介绍	199
5.3	点火系统安全操作要求、检验和排故	201
5.4	点火系统典型零部件的拆装、检验、修理和测试操作程序	205
第6章	航空燃气涡轮发动机指示系统	229
6.1	航空燃气涡轮发动机指示系统简介	229
6.2	B737-300 飞机发动机指示系统和附件介绍	234
6.3	发动机指示系统安全操作要求、检验和排故	247
6.4	发动机指示系统典型零部件的拆装、检验、维修和测试操作程序	249
第7章	航空燃气涡轮发动机滑油系统	272
7.1	发动机滑油系统简介	272
7.2	滑油系统主要零部件介绍	274
7.3	滑油系统安全操作要求、检验、勤务和排故	279
7.4	滑油系统典型零部件的拆装、检验、维修和测试操作程序	282
第8章	航空燃气涡轮发动机空气系统	291
8.1	发动机空气系统简介	291
8.2	空气系统主要零部件介绍	294
8.3	空气系统安全操作要求、检验和排故	296
8.4	空气系统典型零部件的拆装、检验、维修和测试操作程序	299
第9章	航空燃气涡轮发动机起动系统	309
9.1	发动机起动系统简介	309
9.2	起动系统主要零部件介绍	310
9.3	起动系统的安全操作要求、检验和排故	312

9.4 起动系统典型零部件的拆装、检验、维修和测试操作程序	314
第 10 章 飞机辅助动力装置	322
10.1 B737 飞机辅助动力装置简介	322
10.2 B737 飞机辅助动力装置的系统介绍	327
10.3 APU 典型零部件的拆装、检验、维修和测试操作程序	329
第 11 章 发动机维修标准施工与基本技能	361
11.1 发动机零部件安装位置基准	361
11.2 发动机维修基本要求、安全措施和操作规程	367
11.3 发动机维修临时标记	369
11.4 发动机零部件拆装基本技能	370
11.5 密封圈和垫圈的拆装基本施工要求	372
11.6 发动机螺纹紧固件的拆装	373
11.7 紧固件保险	377
11.8 螺纹紧固件的拧紧力矩值和安装操作要求	387
11.9 发动机导线束和电气附件的标准检查方法	392
附录	394
参考文献	397

第1章 航空燃气涡轮发动机及维修简介

1.1 航空燃气涡轮发动机简介

航空燃气涡轮发动机是一种利用气体工质，把燃料燃烧后产生的热能转换为机械能的热力机械。发动机在产生推力或拉力的过程中，不仅气体的物理状态在不断改变，而且气体的能量也在不断地转换。第二次世界大战以前，飞机上的动力装置绝大多数是以汽油为燃料的活塞式航空发动机。二战中，以航空煤油作为燃料的燃气涡轮喷气发动机问世。二战后，人们根据不同的需要，研究和创造了多种类型的燃气涡轮发动机。

航空燃气涡轮发动机种类较多，按其工作原理、结构特点和动力输出方式可以分为涡轮喷气发动机、涡轮螺旋桨发动机、涡轮轴发动机和涡轮风扇发动机等。现代大型民航运输机大多采用涡轮风扇发动机作为动力装置，下面分别进行介绍。

1.1.1 涡轮喷气发动机

涡轮喷气发动机简称涡喷发动机，通常由进气道、压气机、燃烧室、涡轮和尾喷管等部件组成。部分军用发动机的涡轮和尾喷管间还有加力燃烧室。

典型的轴流式涡轮喷气发动机图解，见图 1.1（箭头为气流流向）。

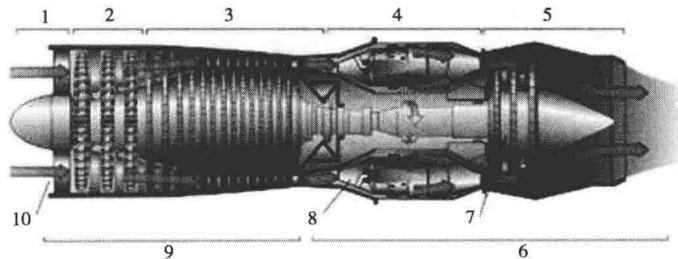


图 1.1 轴流式涡轮喷气发动机

- 1—进气道；2—压气机低压段；3—压气机高压段；4—燃烧室；5—涡轮和尾喷管；
6—发动机热段；7—涡轮；8—燃烧室；9—发动机冷段；10—进气口

涡轮喷气发动机属于热工机械，做功原理同样为：高压下输入能量，低压下释放能量。

航空涡轮喷气发动机各部件的功能如下：

进气道：工作时发动机首先从进气道吸入空气。由于飞行速度是变化的，而压气机对进气速度有严格要求，因而进气道必须可以将进气速度控制在合适的范围内。

压气机：用于提高进气道吸入空气的压力。压气机叶片转动时对气流做功，使气流的压力、温度升高。

燃烧室：自压气机出来的气流随后高压气流进入燃烧室。燃烧室的燃油喷嘴喷射出燃油，燃油与空气混合后点火燃烧，产生高温高压燃气流进入涡轮段。

涡轮：高温高压燃气向后流经涡轮，部分内能在涡轮中膨胀转化为机械能，驱动涡轮旋转。而涡轮同压气机装在同一条轴上，因此涡轮又驱动压气机旋转，从而反复地压缩吸入的空气，把部分的燃油的内能又转变为空气流的压力能。

尾喷管：流过涡轮的高温高压燃气，在尾喷管中继续膨胀，以高速从尾部喷口向后排。这一速度比气流进入发动机的速度大得多，从而产生了对发动机的反作用推力，驱动飞机向前飞行。

上述压气机、燃烧室、涡轮是航空燃气涡轮发动机的核心部件，通常把这三个部件称为核心机或者燃气发生器。根据压气机类型的不同，涡轮喷气发动机又可分为轴流式涡轮喷气发动机和离心式涡轮喷气发动机（见图 1.2）两种。根据转子轴的数量，涡轮喷气发动机又可分为单转子涡轮喷气发动机和双转子涡轮喷气发动机两种。

涡轮喷气发动机有加速快、设计简单等优点，是较早实用化的喷气发动机类型。但如果要让涡轮喷气发动机提高推力，则必须增加燃气在涡轮前的温度和增压比，这将会使排气速度增加而损失更多动能，于是产生了提高推力和降低油耗的矛盾。因此涡轮喷气发动机油耗太高，从经济性方面来考虑，不太适合商业民航运输机。

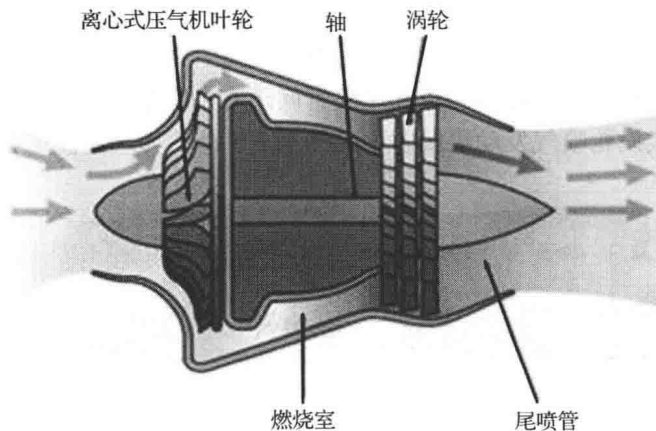


图 1.2 离心式涡轮喷气发动机

1.1.2 涡轮螺旋桨发动机

在涡轮喷气发动机的前面安装减速器，同时在减速器的前面安装螺旋桨为飞机产生牵引力，这种配置构型的涡轮喷气发动机就称为涡轮螺旋桨发动机，简称涡桨发动机。涡轮螺旋桨发动机的特点是涡轮除了带动压气机和附件外，还通过减速器带动螺旋桨。飞机的前进主要靠螺旋桨产生拉力，而喷气的反作用产生的推力在总推力中占比很小。涡轮螺旋桨发动机在低、中速飞行时燃油经济性好，起飞和爬升时也能产生较大的功率，目前大都用作运输机、通用航空飞机或者军用飞机的动力。

涡轮螺旋桨发动机的起飞功率大，油耗低，续航能力强；飞机着陆时还可以利用螺旋桨的逆桨产生反拉力辅助刹车，使着陆滑跑距离大大缩短。

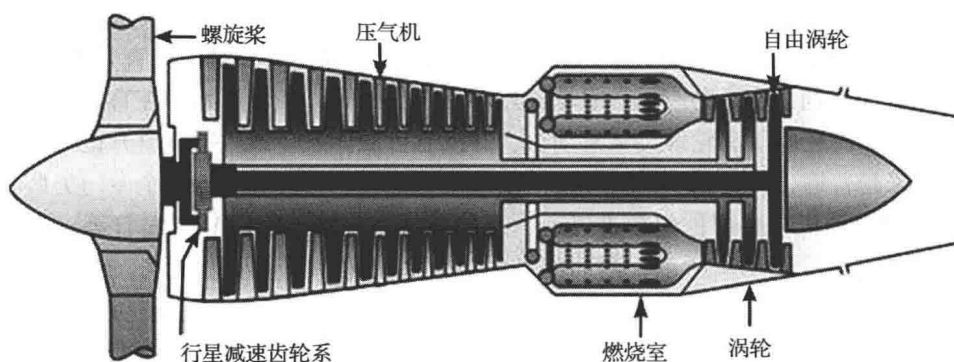


图 1.3 轴流式涡轮螺旋桨发动机

涡轮螺旋桨发动机的燃烧室与涡轮喷气发动机类似，但为了从发动机的排气中获取较多的动力以驱动螺旋桨，涡桨发动机的涡轮级数比较多。相反，由于涡轮喷气发动机主要的推进力都来自于热气直接排放至大气中所产生的反作用力，所以其涡轮级数越少越好，只需保持足够的回收动力用来驱动压气机的叶片。

由于涡轮螺旋桨发动机的螺旋桨尺寸大，旋转时造成其桨叶叶尖部分速度很高，有产生激波的可能。为了防止产生激波，螺旋桨的转速一般设计为大约 1000 r/min 。由于涡轮转动速度很快，因而涡轮与螺旋桨之间必须安装变速齿轮箱，将涡轮转速降至 $1/10$ 左右后再用来驱动螺旋桨，进而降低螺旋桨转速使其叶尖速度不会超过音速。因此就总重量而言，相对于涡喷发动机，涡轮螺旋桨发动机会多出一个变速齿轮箱的重量。减速齿轮箱结构复杂，制造成本高，它的重量一般相当于压气机和涡轮的总重。作为发动机整体结构中的一个部件，减速器在设计、制造和试验中占有相当重要的地位。

涡轮螺旋桨发动机的螺旋桨后的空气流就相当于涡轮风扇发动机的外涵道气流，由于螺旋桨的直径比发动机大很多，气流量也远大于内涵道，所以这种发动机实际上相当于一台超大涵道比的涡轮风扇发动机。

在较低的一定飞行速度范围内, 涡桨发动机的效率高于涡轮风扇发动机。但是使用涡桨发动机的飞机飞行速度通常低于涡轮风扇发动机飞机。涡轮螺旋桨发动机在低速飞行时效率要高于涡轮风扇发动机, 但受到螺旋桨效率的影响, 涡桨发动机飞机飞行速度不能太高, 一般要小于 900 km/h。涡轮螺旋桨发动机被广泛用于中低速飞机或对低速性能有严格要求的军用型和通用型等类型飞机上。

尽管工作原理相似, 但涡轮螺旋桨发动机和涡轮风扇发动机在产生动力方面却有着很大的不同, 涡轮螺旋桨发动机的主要功率输出方式为螺旋桨的轴功率, 而尾喷管喷出的燃气推力极小, 只占总推力的 5% 左右, 为了驱动大功率的螺旋桨, 涡轮级数也比涡轮风扇发动机要多, 一般为 2 ~ 6 级。

1.1.3 涡轮轴发动机

在各类航空燃气涡轮发动机中, 涡轮轴发动机出现得较晚, 但已在直升机和垂直/短距起落飞机上得到了广泛的应用。涡轮轴发动机于 1951 年 12 月开始装在直升机上, 做第一次飞行。那时它属于涡轮螺旋桨发动机, 并没有自成体系。以后随着直升机在各行各业的应用越来越普遍, 涡轮轴发动机才逐渐发展成为燃气涡轮发动机的一个专门类型。

涡轮轴发动机主要部件包括进气道、压气机、燃烧室、涡轮和尾喷管等, 而且还安装有自由涡轮, 如图 1.4 所示, 前面的是两级普通涡轮, 它带动压气机, 维持发动机工作, 后面的二级是自由涡轮, 燃气在其中做功, 通过传动轴专门用来带动直升机的旋翼旋转, 使它升空飞行。此外, 从涡轮流出来的燃气经过尾喷管喷出, 可产生一定的推力, 由于喷速不大, 这种推力很小, 如折合为功率, 大约仅占总功率的 1/10。有时喷速过小, 甚至不产生什么推力。为了合理地安排直升机的结构, 涡轮轴发动机的喷口, 可以向上、向下或向两侧, 不像涡轮喷气发动机那样非向后不可, 这有利于直升机设计时的总体安排。

涡轮轴发动机是用于直升机的, 它与旋翼配合在一起构成了直升机的动力装置。从理论上讲, 旋翼的直径愈大愈好。同样的核心发动机, 产生同样的循环功率, 所配合的旋翼直径愈大, 则在旋翼上所产生的升力愈大。考虑到能量转换的效率以及直升机重量的限制要求, 旋翼的尺寸也不可能过大, 所以旋翼的直径是有限制的。一般来说, 通过旋翼的空气流量是通过涡轮轴发动机的空气流量的 500 ~ 1000 倍。

涡轮轴发动机和直升机的另一种动力装置——活塞发动机相比, 涡轮轴发动机的功率重量比要大得多, 在 2.5 以上。而且就发动机所产生的功率来说, 涡轮轴发动机也大得多, 目前使用中的涡轮轴发动机所产生的功率, 最高可达 6000 hp 甚至 10000 hp, 活塞发动机则相差很远。在经济性上, 涡轮轴发动机的耗油率略高于最好的活塞式发动机, 但它所用的航空煤油要比后者所用的汽油便宜, 这在一定程度上得到了弥补。当然, 涡轮轴发动机也有其不足之处。它制造比较困难, 制造成本也较高。特别是由于旋翼的转速更低, 它需要比涡轮螺旋桨发动机更重更大的减速系统, 有时它的重量竟占发动机总重量的一半以上。

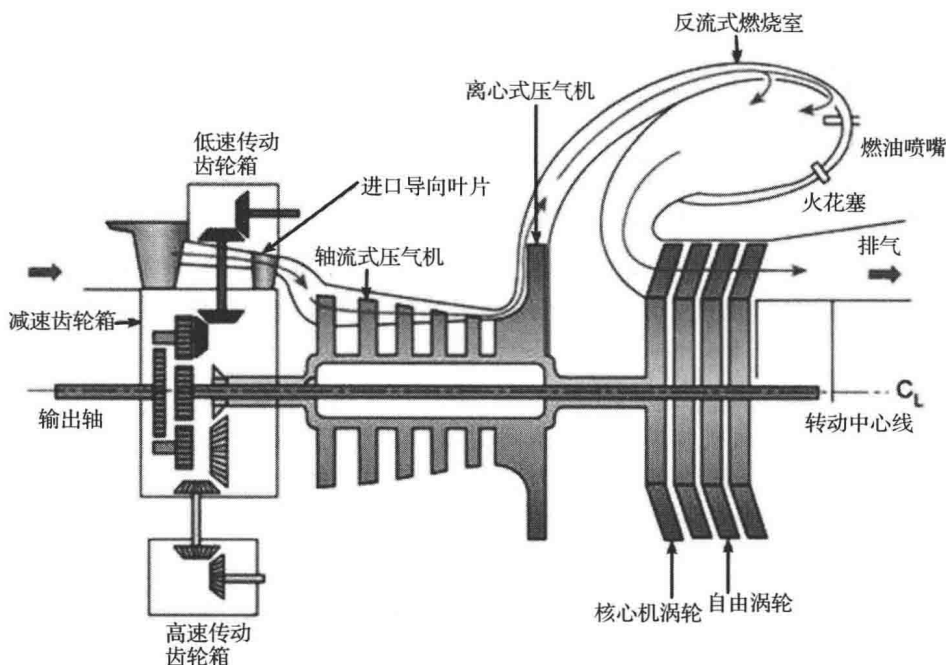


图 1.4 轴流式涡轮轴发动机

涡轮轴发动机的类型有两种：

- (1) 定轴式涡轮轴发动机，输出轴和压气机的主轴通过机械方式连接在一起；
- (2) 自由式涡轮轴发动机，输出轴和压气机轴没有机械连接，而同各自的涡轮连接。

自由式涡轮轴发动机与压气机相连而是用于带动旋翼的涡轮称为自由涡轮，自由涡轮转速小，传动比可以小些，这样就能减轻减速器的重量；同时带动压气机的涡轮比定轴式的涡轮负荷小，发动机容易起动。此外，燃气发生器的工作也比较稳定。目前直升机广泛应用这种发动机。

1.1.4 涡轮风扇发动机

自 20 世纪 30 年代起，带有外涵道的喷气发动机已经出现了一些探索性的早期设计。20 世纪 40 年代和 50 年代早期涡扇发动机开始了试验，但由于对风扇叶片设计制造的要求非常高，未能取得实质性进展。直到 20 世纪 60 年代，人们才得以制造出符合涡扇发动机要求的风扇叶片，从而进入了涡扇发动机实用化的阶段。

20 世纪 50 年代，美国的 NACA（即 NASA，美国航空航天管理局的前身）对涡扇发动机进行了非常重要的科研工作。1955 到 1956 年的研究成果转由通用电气公司（GE）继续深入发展。GE 在 1957 年成功推出了 CJ805-23 型涡扇发动机，立即打破了

超音速喷气发动机的大量纪录。但最早的实用化的涡扇发动机则是普拉特·惠特尼 (Pratt & Whitney) 公司的 JT3D 涡扇发动机。实际上普·惠公司起动涡扇研制项目要比通用电气公司 (GE) 晚, 他们是探听到 GE 在研制 CJ805 的机密后, 匆忙加紧工作, 抢先推出了实用的 JT3D。

1960 年, 罗尔斯·罗伊斯公司的“康威”(Conway) 涡扇发动机开始被波音 707 大型远程喷气客机采用, 成为第一种被民航客机使用的涡扇发动机。20 世纪 60 年代, 洛克西德“三星”客机和波音 747“珍宝”客机采用了罗·罗公司的 RB211-22B 大型涡扇发动机, 标志着涡扇发动机的全面成熟。此后涡轮喷气发动机迅速被西方民用航空工业所弃用。

涡轮风扇发动机由风扇、低压压气机、高压压气机、燃烧室、驱动高压压气机的高压涡轮、驱动低压压气机和风扇的低压涡轮和排气系统组成 (见图 1.5)。其中高压压气机、燃烧室和高压涡轮三部分统称为核心机, 由核心机排出燃气中的可用能量, 一部分传给低压涡轮用以驱动低压压气机和风扇, 余下的部分在喷管中用于加速排出的燃气。风扇转子实际上是一级或几级叶片较长的压气机, 空气流过风扇后, 分成两路: 一路是内涵道气流, 空气继续经压气机压缩, 在燃烧室和燃油混合燃烧, 经涡轮和喷管膨胀, 燃气以高速从尾喷口排出, 产生推力; 另一路是外涵道气流, 风扇后空气经外涵道直接排入大气或同内涵道燃气一起在喷管排出。

涡轮风扇发动机简称涡扇发动机, 由涡轮喷气发动机发展而成。与涡轮喷气比较, 主要特点是首级低压压气机也就是风扇的面积大很多, 将部分吸入的空气通过发动机核心机的外围向后推产生推力。发动机核心机内空气流过的通道称为内涵道, 只有风扇空气经过的核心机机匣外围部分称为外涵道。涡扇引擎最适合飞行速度 400 ~ 1000 km/h 时使用, 因此现在大多数的民航运输机都采用涡轮风扇发动机作为动力装置。

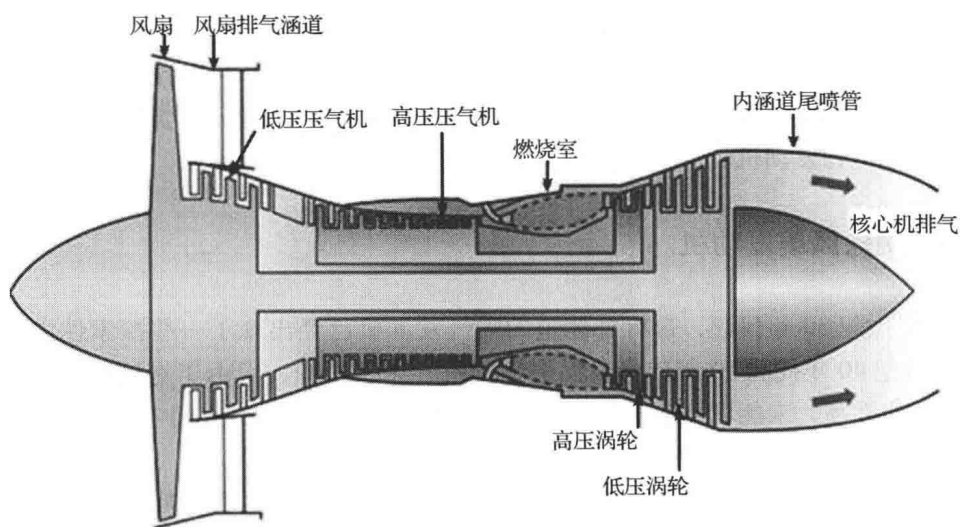


图 1.5 轴流式涡轮风扇发动机

涡轮风扇发动机综合了涡轮喷气和涡轮螺桨发动机的优点。涡扇发动机把大部分的燃气能量转换成驱动风扇和压气机的扭矩，其余的转换成推力。涡扇发动机的总推力是核心机和风扇产生的推力之和，也就是说涡扇发动机的推力由内涵产生的推力和外涵产生的推力两部分组成。这种有内外二个涵道的涡轮风扇发动机又称为内外涵发动机。

涡扇发动机可以是分开排气的或混合排气的，可以是短外涵的或长外涵（全涵道）的。风扇可作为低压压气机的第1级由低压涡轮驱动，也可以由单独的涡轮驱动。对于高涵道比涡扇发动机，风扇产生的推力占比接近总推力的80%。流经外涵和内涵的空气流量之比称为涵道比或流量比。涵道比对涡轮风扇发动机性能影响较大，涵道比大时，耗油率低，但发动机的迎风面积大；涵道比较小时，迎风面积小，但耗油率大。内外涵两股气流分开排入大气的，称为分排式涡轮风扇发动机。内外涵两股气流在内涵涡轮后的混合器中相互渗混后通过同一喷管排入大气的，称为混排式涡轮风扇发动机。涡轮风扇发动机也可安装加力燃烧室，成为加力涡轮风扇发动机。在分排式涡轮风扇发动机上的加力燃烧室可以分别安装在内涵涡轮后或外涵通道内，在混排式涡轮风扇发动机上则可装在混合器后面。

涡扇发动机的涵道比（Bypass Ratio，也称旁通比）是不经过燃烧室的空气质量流量，与通过燃烧室的空气质量流量的比例。涵道比为零的涡扇发动机即涡轮喷气发动机。早期的涡扇发动机和现代战斗机使用的涡扇发动机涵道比都较低。例如，世界上第一款涡扇发动机，罗·罗公司的 Conway，其涵道比只有0.3。现代多数民航机发动机的涵道比通常都在5以上。涵道比高的涡轮扇发动机耗油较少，但推力却与涡轮喷气发动机相当。

涡桨发动机的推力有限，同时影响飞机提高飞行速度，因此必须提高喷气发动机的效率。发动机的效率包括热效率和推进效率两个部分。提高燃气在涡轮前的温度和压气机的增压比，就可以提高热效率，因为高温、高密度的气体包含的能量要大。但是，在飞行速度不变的条件下，提高涡轮前温度，自然会使排气速度加大，而流速快的气体在排出时动能损失大。因此，片面地加大热功率，即加大涡轮前温度，会导致推进效率的下降。要全面提高发动机效率，必须解决热效率和推进效率这一对矛盾。

涡轮风扇发动机的优点就是既提高了涡轮前温度，又不增加排气速度。涡扇发动机的结构，实际上就是涡轮喷气发动机的后面再增加了几级涡轮，这些涡轮带动风扇和低压压气机。风扇吸入的气流一部分如普通喷气发动机一样流入内涵道，另一部分则直接从外涵道向外排出。因此，涡扇发动机的燃气能量被分配到了风扇和燃烧室分别产生的两种排气气流上。为了提高热效率而提高涡轮前温度，可以通过适当的涡轮结构和增大风扇直径，使更多的燃气能量经风扇传递到外涵道，从而避免大幅增加排气速度。这样，热效率和推进效率取得了平衡，发动机的效率得到极大提高。效率高就意味着油耗低，飞机航程变得更远。

与涡轮喷气发动机、涡桨发动机等比较，涡轮风扇发动机的优点包括起飞推力大、推重比高、燃油消耗率低、加力比高、风扇叶尖M数小、风扇效率比螺旋桨高和排气噪音小等等。