



国防特色教材·动力机械及工程热物理

典型航空发动机结构对比与分析

DIANXING HANGKONG FADONGJI JIEGOU DUIBI YU FENXI

—— 张 辉 闫晓军 主编 王建军 编著 ——

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·动力机械及工程热物理

典型航空发动机结构 对比与分析

闫晓军 主编
张 辉 洪 杰 王建军 编著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

内 容 简 介

航空燃气涡轮发动机是目前飞机的主要动力装置。本书选取军用航空发动机第二代(WP7)和第三代(AJ1-31Φ)两机型作为结构介绍和分析的对象,从总体结构、压气机、燃烧室、涡轮、加力燃烧室和尾喷管、发动机的附件传动装置与工作系统六个方面分别细致介绍了两型航空发动机的总体与部件结构,并进行了对比分析和研究,使读者可以较好地了解航空发动机的结构设计特点,以及不断采用的新技术和快速发展的趋势及途径。

本书主要供飞行器动力工程、交通运输工程专业的本科生在学习“专业课程设计”期间使用,也可供航空发动机相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

典型航空发动机结构对比与分析/闫晓军主编. --
北京:北京航空航天大学出版社,2011.8
ISBN 978-7-5124-0507-3

I. ①典… II. ①闫… III. ①航空发动机—结构分析
IV. ①V23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 130825 号

版权所有,侵权必究。

典型航空发动机结构对比与分析

闫晓军 主编

张 辉 洪 杰 王建军 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: bhpess@263.net 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:10 字数:224 千字

2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-0507-3 定价:33.00 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

序(一)

培养学生在航空发动机结构方面的知识和分析能力,对航空发动机专业来说是非常重要的。为了保证实现这个教学环节,就需要有好的教材,这样既能讲述结构基本知识,又能适应快速发展和新技术应用的形势。《典型航空发动机结构对比与分析》是一本新编写的教材,其体系和内容与以前的教材有很大的不同,是作者多年来对航空发动机结构的分析研究、教学实践、下到工厂的生产车间和试验车间深入调查研究的结果,是花费了大量精力编写的一本符合教学要求并具有如下特点的教材。

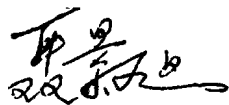
1. 选材合适,内容丰富。该教材选取 WP7 和 AJI-31Φ 两型航空发动机作为结构介绍和分析对象。WP7 是双转子带加力的涡轮喷气发动机,采用了超声压气机,加力喷口为无级可调的收敛式喷口,发动机结构简单,推重比较大,使用寿命长,可靠性较高,得到广泛应用,属于较典型的第二代航空发动机,现仍在使用。AJI-31Φ 是双转子双涵道带加力的涡轮风扇发动机,它的压比高,涡轮前温度高,转速高,推重比大,耗油率低,性能优良,使用寿命长,可靠性高,气流通道中多处调节,采用无级可调超声速喷口,结构采用单元体设计,监测参数多,可视情维修,采用了很多新技术,大幅提升了结构设计水平,是一台典型的第三代航空发动机。选取这样两种典型的、成熟的航空发动机结构进行介绍和分析,可以使学生较好地了解航空发动机的结构设计特点,以及不断采用的新技术和快速发展的趋势与途径。

2. 系统性较好。现代航空发动机结构复杂,零件、组件数量大,附件和管路系统很多,直观的感觉是十分庞大,因此,如何使航空发动机结构在教材中具有清晰的条理是很重要的。该教材从发动机设计要求出发,抓住转子支承和承力系统为框架,再按部件层层展开介绍和分析,这样就显现出了较好的系统性,可以使学生在学习时易于抓住要领,理解航空发动机结构设计的思路。

3. 对比分析法。本书采用了对比分析的方法,把两型发动机结构设计特点进行具体对比分析,这是非常好的。对比法是深刻认识事物的好方法,也是对问题

深入研究的好方法。由于采用了对比分析,不仅有利于学生较好地学习发动机的结构,还可以引发学生深思一些问题,以及启迪今后进行创造性的研究工作的兴趣与思路。

该教材书写简洁、文笔流畅、深入浅出、图文并茂,适于阅读,每章还附有大量思考题,有助于学生深入了解。我认为这是一本内容丰富、特色鲜明的教材,在教学中将发挥很好的作用。



2011年3月

序(二)

《典型航空发动机结构对比与分析》教材是为飞行器动力工程和交通运输工程专业的学生学习“专业课程设计”而编写的。“专业课程设计”以前称“航空发动机结构课程设计”,是在 20 世纪 50 年代北京航空学院成立之初,由当时前苏联专家根据莫斯科航空学院的经验和建议设立的,是在该专业学生学习了有关航空发动机原理、结构、工艺等课程后的一个重要的实践环节。它是通过对典型航空发动机的结构进行学习和分析,在了解该发动机的总体结构设计后,进行某一部件结构图的读图、深入分析,并按 1:1 的比例,绘出该部件结构图及某一个零件的零件设计图,从而加深理解航空发动机的结构设计,提高在专业方面的工程素养和实践能力。半个多世纪的教学实践,证实了这门课程设计在培养学生全面发展的过程中有着重要的作用。

在半个多世纪以来,一直没有一本为本课程设计编写的教材,以往仅采用发动机生产工厂编写的、较为简单的结构说明书作为课程设计的主要参考资料。本教材的出版,填补了长期以来在“专业课程设计”上无教材的尴尬局面,今后将会在培养学生、提高学习质量方面起到较好的作用。

本教材在选材上,除采用了我国大批战斗机用的涡喷七(WP7)发动机外,还采用了用于第三代战斗机歼十的 AJI-31Φ 发动机,有助于适应航空发动机的发展,具有一定的先进性。涡喷七属于第二代战斗机的发动机,虽然将逐渐被淘汰,但它的结构设计思路、采取的措施等是发动机结构设计的基础知识,仍具有一定的使用价值,可供设计人员参考。

本书在编写中,除对发动机总体设计、主要部件、附件及工作系统作了论述外,还进行了必要的分析,使读者不仅可以了解发动机的结构设计,还可以获知设计的依据及其优缺点,培养学生开展设计工作的初步能力。在每一章中,除分别对这两型发动机的部件作论述外,还对两型发动机在该部件的结构设计上作了对比分析。所有这些,均能为学生今后进行发动机设计工作打下良好的基础。

本教材能理论联系生产和实际使用,系统性较强。在教材中选用了较多且较详尽的工程图,能帮助读者较深入地了解这两型发动机的结构设计,不仅能作为课程设计的教材,也可供生产、使用与维护发动机的工程技术人员参考。

陈光

2011年3月9日

前 言

北京航空航天大学“飞行器动力工程”与“交通运输工程”专业的学生在学习了“航空发动机结构”、“航空发动机强度振动”、“航空发动机原理”、“弹性力学”和“气动力学”等专业基础课之后,还有一门重要的实践课程——“专业课程设计”。该课程主要的教学内容为:通过对典型航空发动机结构进行学习和分析,并在此基础上完成读图、制图、零件设计等实践环节,从而加深理解航空发动机结构设计思想,进一步提高在专业方面的工程素养和实践能力。

在很长一段时间内,“专业课程设计”选用 WP7 发动机作为研究对象。WP7 发动机正在逐步退役,并且该发动机在结构设计方面已经不能代表现代发动机结构设计的新技术和趋势,因此,有必要在教材编写中引入先进航空发动机机型,对其结构设计特点进行分析,并和原来的 WP7 进行对比,以增强和提高教学效果。本教材主要供飞行器动力工程、交通运输工程专业的本科生在学习“专业课程设计”期间使用,也可供航空发动机相关技术人员参考。

多位北京航空航天大学能源与动力工程学院航空推进系的老师参加了讲义的整理和编写。第 1、4、7 章由闫晓军编写;第 2 章由洪杰编写;第 3 章由张辉编写;第 5 章由张辉和闫晓军编写;第 6 章由王建军和闫晓军编写。

405 教研室的各位老师们在航空发动机结构方面为本书提供了丰富的素材和图片。感谢陈光教授、马枚教授、王延荣教授和樊江副教授为课程设计所做的贡献。

在书稿完成之后,著名的航空发动机专家聂景旭教授、陈光教授逐字逐句地审阅了本书,提出了多处修改意见。两位先生还欣然为本书撰写了序言,向读者推荐此书。感谢两位先生!

感谢空军装备研究院航空装备研究所的杨兴宇高工、5719 工厂的王兵高工、西北工业大学的蔡元虎教授为本书的写作提供了宝贵的意见。

在本书的成稿过程中,孙瑞杰博士参与了插图和文字的修订工作。其他参与的研究生还有:邓瑛、张小勇、张凯、谢建文和陈霞。感谢他们的劳动和付出!

教材的初稿在北京航空航天大学动力学院的课程设计中已经使用多年,几经修改,但限于编者的知识水平,错误在所难免,恳请读者批评指正。

作 者
2011 年 3 月

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 航空发动机的发展简介	1
1.2 航空发动机的结构设计特点	4
1.3 涡轮喷气发动机——WP7	6
1.4 涡轮风扇发动机——AJI-31Φ	9
1.5 思考题	13
第 2 章 总体结构	14
2.1 概 述	14
2.1.1 转子支承方案	15
2.1.2 联轴器	16
2.1.3 支承结构	17
2.1.4 静子承力系统	19
2.2 WP7 发动机总体结构	19
2.2.1 WP7 转子支承方案	19
2.2.2 WP7 联轴器	20
2.2.3 WP7 支承结构	21
2.2.4 WP7 静子承力系统	26
2.3 AJI-31Φ 发动机总体结构	28
2.3.1 AJI-31Φ 转子支承方案	28
2.3.2 AJI-31Φ 联轴器	29
2.3.3 AJI-31Φ 支承结构	30
2.3.4 AJI-31Φ 静子承力系统	34
2.4 总体结构对比分析	35
2.4.1 转子支承方案	35
2.4.2 联轴器	36
2.4.3 支承结构	36
2.4.4 静子承力系统	37
2.5 思考题	38

第3章 压气机结构	39
3.1 概 述	39
3.1.1 压气机转子	39
3.1.2 压气机静子	41
3.1.3 压气机的防冰与防喘	42
3.1.4 压气机主要零件的材料	42
3.2 WP7 发动机压气机	43
3.2.1 WP7 压气机转子	44
3.2.2 WP7 压气机静子	50
3.2.3 WP7 压气机的防冰与防喘	54
3.2.4 WP7 压气机主要零件的材料	55
3.3 AJI-31Φ 发动机压气机	56
3.3.1 AJI-31Φ 压气机转子	58
3.3.2 AJI-31Φ 压气机静子	59
3.3.3 AJI-31Φ 压气机的防冰与防喘	65
3.3.4 AJI-31Φ 压气机主要零件的材料	66
3.4 压气机结构对比分析	66
3.5 思考题	68
第4章 燃烧室结构	69
4.1 概 述	69
4.1.1 燃烧室的组成及结构	70
4.1.2 燃烧室的类型	73
4.1.3 燃烧室的材料及涂层	75
4.2 WP7 发动机燃烧室	76
4.2.1 概 述	76
4.2.2 结构分析	77
4.2.3 主要零件的材料及涂层	79
4.3 AJI-31Φ 发动机燃烧室	80
4.3.1 概 述	80
4.3.2 结构分析	81
4.3.3 主要零件的材料及涂层	83
4.4 燃烧室结构对比分析	83

4.5 思考题	84
第5章 涡轮结构	85
5.1 概 述	85
5.1.1 涡轮转子	86
5.1.2 涡轮静子	89
5.1.3 涡轮部件的冷却	90
5.1.4 涡轮部件主要零件的材料	90
5.2 WP7 发动机的涡轮	91
5.2.1 WP7 涡轮转子	93
5.2.2 WP7 涡轮静子	96
5.2.3 WP7 涡轮部件的冷却	101
5.2.4 WP7 涡轮主要零件的材料	102
5.3 AJI-31Φ 发动机的涡轮	102
5.3.1 AJI-31Φ 涡轮转子	104
5.3.2 AJI-31Φ 涡轮静子	106
5.3.3 AJI-31Φ 涡轮部件的冷却	108
5.3.4 AJI-31Φ 涡轮主要零件的材料	111
5.4 涡轮结构对比分析	112
5.5 思考题	113
第6章 加力燃烧室和尾喷管	114
6.1 概 述	114
6.1.1 加力燃烧室	114
6.1.2 尾喷管	117
6.1.3 加力燃烧室的材料	118
6.2 WP7 发动机加力燃烧室和尾喷管	118
6.3 AJI-31Φ 发动机加力燃烧室和尾喷管	125
6.4 加力燃烧室和尾喷管结构对比分析	129
6.5 思考题	130
第7章 发动机的附件传动装置与工作系统	131
7.1 概 述	131
7.1.1 附件传动装置	131

7.1.2	控制系统	132
7.1.3	滑油系统	133
7.1.4	启动系统	133
7.2	WP7 发动机附件传动与工作系统	134
7.2.1	WP7 附件传动系统	134
7.2.2	WP7 控制(燃油)系统	135
7.2.3	WP7 滑油系统	136
7.2.4	WP7 启动系统	137
7.3	AJ1-31Φ 发动机附件传动与工作系统	137
7.3.1	AJ1-31Φ 附件传动系统	137
7.3.2	AJ1-31Φ 发动机控制系统	140
7.3.3	AJ1-31Φ 滑油系统	144
7.3.4	AJ1-31Φ 启动系统	146
7.4	附件传动装置与工作系统对比分析	147
7.5	思考题	147
参考文献		148

第1章 概述

1.1 航空发动机的发展简介

航空发动机的历史可以从1903年美国莱特兄弟实现人类历史上首次有动力飞行算起。从1903年至今,航空发动机的发展可以分为两个阶段。第一阶段从1903年到第二次世界大战结束,持续40年左右,为活塞发动机统治时期。在第二次世界大战结束前后,活塞发动机的功质比(功率/质量)已达到 $1\,492\text{ W/kg}$ (2 hp/kg),飞行高度达 15 km ,飞行速度从 16 km/h 提高到 800 km/h ,接近了螺旋桨飞机的速度极限。由于受到推进原理的限制,采用活塞发动机的飞机速度不能再进一步提高,不可能达到或者接近声速,因此随着涡轮喷气发动机的出现和发展,航空发动机进入了它发展的第二阶段——喷气推进时代^[1,3]。

喷气式发动机是一种直接反作用的推进装置。低速工质(空气和燃料)经过增压、燃烧以后,以高速喷出,从而直接产生反作用力。最早的喷气式发动机专利是法国工程师雷因·洛兰在1913年获得的^[2]。其工作原理如图1.1所示,空气由进气道进入,经供油系统后在燃烧室内燃烧,然后从推进喷管喷出产生推力。尽管当时的制造和材料工艺都无法生产出这样的发动机,但其工作原理与现代冲压喷气发动机非常相似。

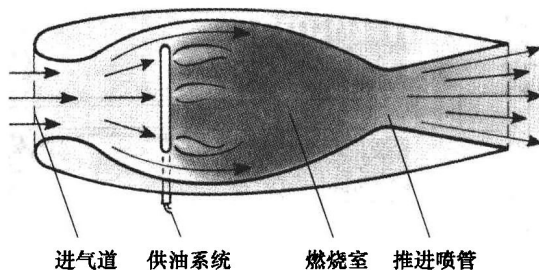


图 1.1 雷因·洛兰设计的发动机^[2]

从图1.1中可以看到,雷因·洛兰设计的发动机没有压气机,即空气从进气道进入后,没有部件对空气进行增压。目前,飞机上带有压气机的空气喷气发动机是英国人弗兰克·惠特尔(Frank Whittle)和德国人汉斯·冯·奥海因在1937—1938年间分别发明的^[3]。空气喷气发动机可以根据是否带有压气机分为燃气涡轮发动机(带有压气机)和冲压喷气发动机(不带有压气机)。其中,有压气机、燃烧室以及驱动压气机的燃气涡轮的空气喷气发动机,称为燃气涡轮发动机。燃气涡轮发动机可以应用于船舶、车辆、发电机组等,当用作飞行器动力装置时

则称为航空燃气涡轮发动机。在航空燃气涡轮发动机中,尤以涡轮喷气发动机(简称涡喷发动机)和涡轮风扇发动机(简称涡扇发动机)最为常用。其他的航空燃气轮机还有涡轮螺旋桨发动机(简称涡桨发动机)和涡轮轴发动机(简称涡轴发动机)等。

航空燃气涡轮发动机主要由进气装置、压气机、燃烧室、燃气涡轮和尾喷管组成。其工作原理是:从进气装置进入发动机的空气经压气机压缩提高压力,之后流入燃烧室与喷入的燃油(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、高压的燃气,再进入驱动压气机的燃气涡轮中膨胀做功,带动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,使发动机能够连续工作。由燃气涡轮出来的燃气,仍具有一定的压力和温度(即具有一定的能量),所有的燃气涡轮发动机都是利用这部分能量来产生发动机的推力或输出功率的。根据这股燃气能量利用方式的不同,可以将发动机划分为不同的类型。

此外,在航空燃气涡轮发动机中,压气机、燃烧室以及驱动压气机的燃气涡轮(简称涡轮)组合后,称为核心机。在高压比的压气机中,为了获得较宽的稳定工作范围,常将它分为串联的两部分,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,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。连接低压压气机和低压涡轮的轴,称为低压转子轴,而连接高压压气机和高压涡轮的轴,称为高压转子轴。低压转子轴穿过空心的高压转子轴,这种结构形式称为双转子结构,如图 1.2 所示。

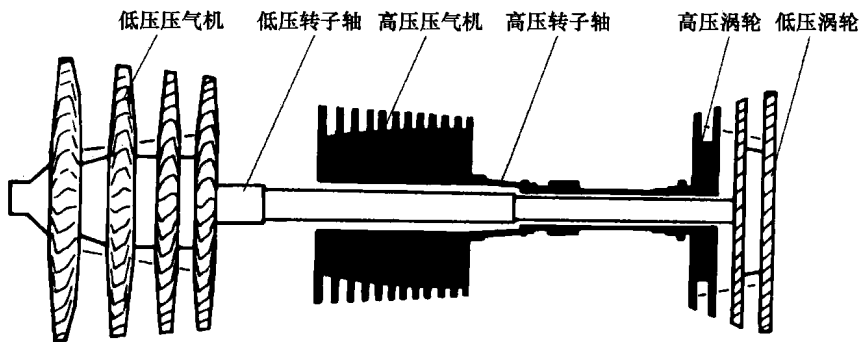
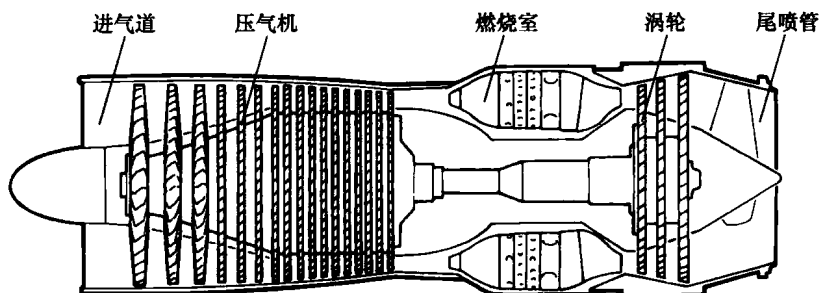


图 1.2 双转子的结构示意图

下面介绍常用的四种航空发动机的工作原理^[2,4]。

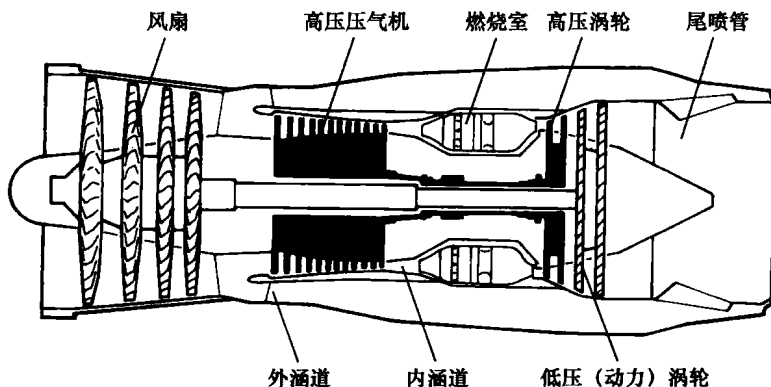
1. 涡喷发动机

如图 1.3 所示,在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,之后高速从尾喷管中排出,从而产生推力。这种发动机称为涡轮喷气发动机。国产涡喷发动机的简称为 WP,是“涡喷”二字汉语拼音的首字母。

图 1.3 涡喷发动机工作原理图^[2]

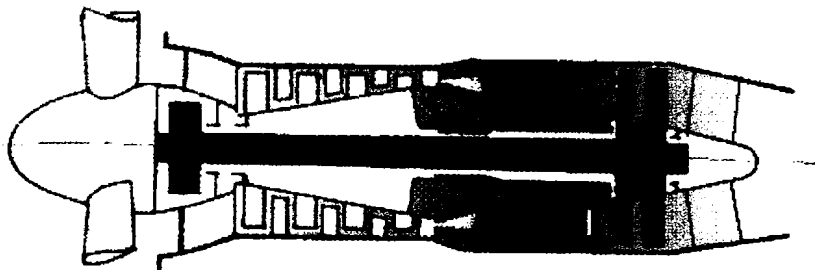
2. 涡扇发动机

如图 1.4 所示,涡扇发动机与涡喷发动机的区别在于:低压压气机变成长叶片的风扇,当流入发动机的空气在风扇中增压后,一部分流入核心机,为内涵气流(与涡喷发动机情况相同);还有一部分由围绕核心机外壳的外环中流过,称为外涵气流。两股气流可分别排出,也可以混合后一起排出。发动机的推力由内涵和外涵气流分别产生的推力组成。低压(动力)涡轮的传动轴通过核心机转子中心,驱动外径比核心机大一级或几级风扇的叶片(实际上就是压气机叶片),外涵与内涵空气流量之比称为流量比(或涵道比)。涡扇发动机具有耗油低、起飞推力大、噪声低、迎风面积大等特点。国产涡扇发动机的简称为 WS。

图 1.4 涡扇发动机示意图^[2]

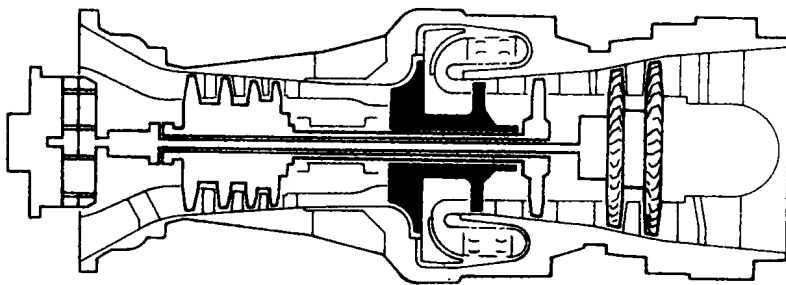
3. 涡桨发动机

如图 1.5 所示,动力涡轮把核心机出口燃气中的大部分可用能量转变为轴功率,通过减速器驱动螺旋桨,燃气中的剩余小部分可用能量在喷管中转化为气流动能,直接产生推力。国产涡桨发动机的简称为 WJ。

图 1.5 涡桨发动机示意图^[2]

4. 涡轴发动机

如图 1.6 所示,涡轴发动机工作原理和结构与涡桨发动机基本相同,但其核心机出口燃气所含可用能量几乎全部被动力涡轮吸收,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,而由喷管流出的燃气只产生很小的推力或根本不产生推力。国产涡轴发动机的简称为 WZ。

图 1.6 涡轴发动机示意图^[2]

1.2 航空发动机的结构设计特点

航空发动机的研制包括基础研究、预先研究和型号发展等阶段。从结构设计角度来说,基础研究阶段主要包括对新理论、新方法、新材料和新型结构形式的研究。预先研究阶段则是针对先进部件、核心机或验证机开展的研制工作。例如,可以利用一个先进的核心机,如果增加低压压气机(风扇)及低压涡轮,那么就可以发展成为涡轮风扇发动机;验证机是核心机的直接发展,它可以是完全按照飞机战术要求设计制造的原型机,也可以是在尺寸或结构上与实际发