



航空航天工程类专业规划教材

# 航空叶片机原理 (第2版)

HANGKONG YEPIANJI YUANLI

胡骏 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

014029372

V231.3-43

01-2

航空航天工程类专业规划教材

# 航空叶片机原理

(第2版)

胡骏 主编



国防工业出版社

·北京·

V231.3-43

01-2

## 内 容 简 介

本书系统介绍航空叶片机的工作原理、工作特性以及基本的设计理论和设计方法,包括航空叶片机的基本设计体系、研究方法和发展方向。全书共分3篇15章:第1篇介绍叶片机中的气动热力学基础,包括第1章绪论,第2章叶片机中气体流动的性质和控制方程,第3章一维定常流动的基本方程和热力学图示;第2篇介绍压气机,包括第4章轴流式压气机,第5章基元级的基本理论,第6章级的基本理论,第7章多级轴流式压气机,第8章离心式压气机,第9章压气机的特性和调节;第3篇介绍轴流式涡轮,包括第10章轴流式涡轮的工作原理,第11章基元级的基本理论,第12章级的基本理论,第13章多级轴流式涡轮,第14章涡轮特性,第15章涡轮冷却。

本书主要是为飞行器动力工程专业相关课程教学编写的,也可作为电力、石油、化工、建筑等行业相关专业本科生和研究生的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

航空叶片机原理/胡骏主编. —2版. —北京:国防工业出版社,2014.2

航空航天工程类专业规划教材

ISBN 978-7-118-09165-6

I. ①航… II. ①胡… III. ①航空发动机-叶片-高等学校-教材 IV. ①V232.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第024275号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 13¼ 字数 312千字

2014年2月第2版第1次印刷 印数1—3000册 定价28.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

人类实现有动力飞行已有一百多年的历史,飞机的发明、应用和迅速发展有力地推动了人类文明的进步,改善着人类生活的时空。作为飞机的“心脏”,航空发动机同样经历了辉煌的发展历程,每一次航空技术的重大进展,无不与航空发动机技术的突破相关。

目前航空飞行器广泛使用的是带有压气机的燃气涡轮发动机。在燃气涡轮发动机中,风扇、压气机、涡轮和螺旋桨均属于叶片机。简单地从组成燃气涡轮发动机的主要部件中叶片机所占的比例,就不难理解叶片机是燃气涡轮发动机的主要部件。对于燃气涡轮发动机来说,叶片机很重要的更为实质的含义在于叶片机的性能好坏对全台燃气涡轮发动机的性能影响很大,而且叶片机的设计难度大,往往是发动机中设计难度最大的部件。本书的主要研究对象是航空燃气涡轮发动机采用的风扇、压气机和涡轮。

半个多世纪以来,航空燃气涡轮发动机技术始终沿着高推重比、低油耗、长寿命和高可靠性的方向飞速发展。航空燃气涡轮发动机的推力已由最初的  $200\text{daN} \sim 300\text{daN}$  发展到现在的  $570\text{kN}$ ,几乎增大了 200 倍;耗油率由最初的大于  $0.1\text{kg}/(\text{N} \cdot \text{h})$  降到了  $0.035\text{kg}/(\text{N} \cdot \text{h})$ ,降低了约  $2/3$ ;发动机的寿命也由最初的几十小时发展到了 2 万小时  $\sim$  3 万小时,而推重比则由最初的小于 1 发展到了大于 10。

为了满足航空燃气涡轮发动机的发展需要,航空叶片机的风扇/压气机始终沿着高压比、高速度和高效率的方向不断发展,而涡轮沿着高进口温度、高速度和高效率的方向不断发展。风扇/压气机的总增压比已从 20 世纪 40 年代初的  $3 \sim 4$  发展到现在的  $25 \sim 52$ 。而且为了减少轴向长度和重量,风扇/压气机的级负荷不断增大。涡轮的进气温度从 20 世纪 40 年代初的  $1073\text{K}$  发展到现在的  $1900\text{K} \sim 2000\text{K}$ ,并且还出现了超音速涡轮级。

作为以流体为介质的能量传输和转换的旋转机械,叶片机在国民经济的其他众多领域内也有着广泛的应用,如地面燃气轮机、汽轮机、水轮机以及各类泵、鼓风机和通风机等。

正是在这种背景下,为了适应新技术的发展对于人才培养的要求,编者基于多年来从事飞行器动力工程专业教学和科研的经验,并综合了大量国内外的相关教材和最新科研成果编写了本书。

本书以航空叶片机(压气机与涡轮)为对象,系统介绍压气机和涡轮的结构与工作原理。本书结合国内外现代航空叶片机的发展特点,深入地介绍了压气机和涡轮基元级的工作原理,以及完全径向平衡方程及其工程应用,对单级和多级压气机、涡轮的特性及调节规律进行了深入的阐述。由于压气机与涡轮的内部流动规律存在许多类似之处,所以,本书中主要的章节是压气机,在讲授涡轮时,应该适当地参阅压气机章节中的内容。各章节附有若干题目,使学习者

#### IV

在学习有关理论的同时,得以一定的练习,牢固地掌握学到的知识。

本书可作为飞行器动力工程专业本科学生的必修课教材,也可作为航空发动机设计、试验和维护的有关专业人员的参考书,同时对燃气轮机、汽轮机、水轮机以及各类泵、鼓风机和通风机等专业的研究人员具有一定的参考作用。

本书由胡骏主编,吴铁鹰、王英锋参编。全书共分3篇15章,1~7章由胡骏编写,8、9章由王英锋编写,10~15章由吴铁鹰编写。全书由胡骏统稿。

由于编者水平有限,难免有不妥之处,敬请读者不吝批评指正。

编者

2013年8月于南京

# 目 录

## 第 1 篇 叶片机中的气动热力学基础

第 1 章 绪论 .....	2
1.1 燃气涡轮发动机的主要部件 .....	2
1.2 航空叶片机的主要类型 .....	6
第 2 章 叶片机中气体流动的性质和控制方程 .....	9
2.1 叶片机中气体流动的性质 .....	9
2.2 叶片机中气体流动的控制方程 .....	11
第 3 章 一维定常流动的基本方程和热力学图示 .....	13
3.1 一维定常流动的基本方程 .....	13
3.2 流动过程的热力学图示 .....	17
思考题和习题 .....	22

## 第 2 篇 压 气 机

第 4 章 轴流式压气机 .....	24
4.1 轴流式压气机的工作原理 .....	24
4.2 压气机的性能参数 .....	26
第 5 章 基元级的基本理论 .....	28
5.1 基元级 .....	28
5.2 基元级的加功扩压原理 .....	30
5.3 基元级速度三角形 .....	33
5.4 反力度 .....	37
5.5 叶型和叶栅的主要几何参数 .....	39
5.6 平面叶栅的气动力参数 .....	41
5.7 平面叶栅风洞试验研究 .....	51

5.8	超音速基元级	62
5.9	压气机叶片叶型	65
	思考题和习题	70
<b>第6章</b>	<b>级的基本理论</b>	<b>72</b>
6.1	压气机中的三元流计算概述	73
6.2	完全径向平衡方程	74
6.3	简化径向平衡方程	76
6.4	等环量分布规律	78
6.5	等反力度分布规律	82
6.6	通用规律	84
6.7	级的流动损失	86
6.8	级的增压比和效率	90
	思考题和习题	91
<b>第7章</b>	<b>多级轴流式压气机</b>	<b>92</b>
7.1	多级轴流式压气机的压比和效率	93
7.2	环壁附面层对轮缘功和流量的影响	95
7.3	轴流式压气机的流程(或通道)形式	97
7.4	气动参数的分配	98
	思考题和习题	102
<b>第8章</b>	<b>离心式压气机</b>	<b>103</b>
8.1	离心式压气机的主要部件及其作用	103
8.2	离心式压气机中气体流动的特点	104
8.3	离心式压气机的轮缘功和效率	110
8.4	超音速离心式压气机	112
	思考题和习题	114
<b>第9章</b>	<b>压气机的特性和调节</b>	<b>116</b>
9.1	压气机的工作范围	116
9.2	压气机的流量特性及其绘制	117
9.3	流量特性线的变化特点	120
9.4	压气机进口总压和总温对流量特性线的影响	122
9.5	相似理论在叶片机中的应用	124
9.6	压气机的通用特性线	127

9.7 压气机中的不稳定流态 .....	129
9.8 叶片机的气动弹性不稳定现象——颤振 .....	134
9.9 进口流场畸变对压气机稳定性和性能的影响 .....	136
9.10 非设计工况下多级轴流压气机中各级的工作特点 .....	143
9.11 涡轮喷气发动机上压气机发生气动失稳的条件和扩大稳定区的方法 .....	147
9.12 提高轴流式压气机稳定裕度的可能途径 .....	152
思考题和习题 .....	156

### 第3篇 轴流式涡轮

<b>第10章 轴流式涡轮的工作原理</b> .....	158
10.1 涡轮的工作原理 .....	158
10.2 涡轮中气体流动所遵循的能量方程和动量矩方程 .....	160
<b>第11章 基元级的基本理论</b> .....	163
11.1 决定基元级速度三角形的主要参数 .....	163
11.2 反力度 .....	164
11.3 涡轮叶栅中的流动 .....	166
11.4 叶型损失及其工程估算 .....	168
<b>第12章 级的基本理论</b> .....	173
12.1 级空间的气流组织 .....	173
12.2 级的流动损失 .....	176
12.3 涡轮效率和涡轮功率 .....	177
12.4 单级涡轮气动设计简介 .....	178
<b>第13章 多级轴流涡轮</b> .....	183
13.1 采用多级的原则 .....	183
13.2 主要参数在各级中的分配 .....	183
13.3 多级涡轮的绝热效率 .....	184
<b>第14章 涡轮特性</b> .....	187
14.1 涡轮的非设计工作状态 .....	187
14.2 涡轮的相似工作条件 .....	188
14.3 单级涡轮的特性 .....	190
14.4 多级涡轮的特性 .....	191



14.5	涡轮特性线的其他形式 .....	194
14.6	用转动喷嘴环的方法调节涡轮 .....	198
<b>第 15 章</b>	<b>涡轮冷却 .....</b>	<b>199</b>
	思考题和习题 .....	201
	<b>参考文献 .....</b>	<b>203</b>

# 第1篇

## 叶片机中的气动热力学基础

# 第1章

## 绪论

### 1.1 燃气涡轮发动机的主要部件

人类实现有动力飞行已有一百多年的历史,飞机的发明、应用和迅速发展有力地推动了人类文明的进步,改善着人类生活的时空。作为飞机的“心脏”,航空发动机同样经历了辉煌发展的一百多年,每一次航空飞行的重大进展,无不与航空发动机技术的突破相关。

航空发动机是将燃料的化学能转变为轴功或飞机推进功的热力机械。在过去的一百多年里,人类所使用的航空发动机主要可分为活塞式和喷气式两大类,如图1-1所示。

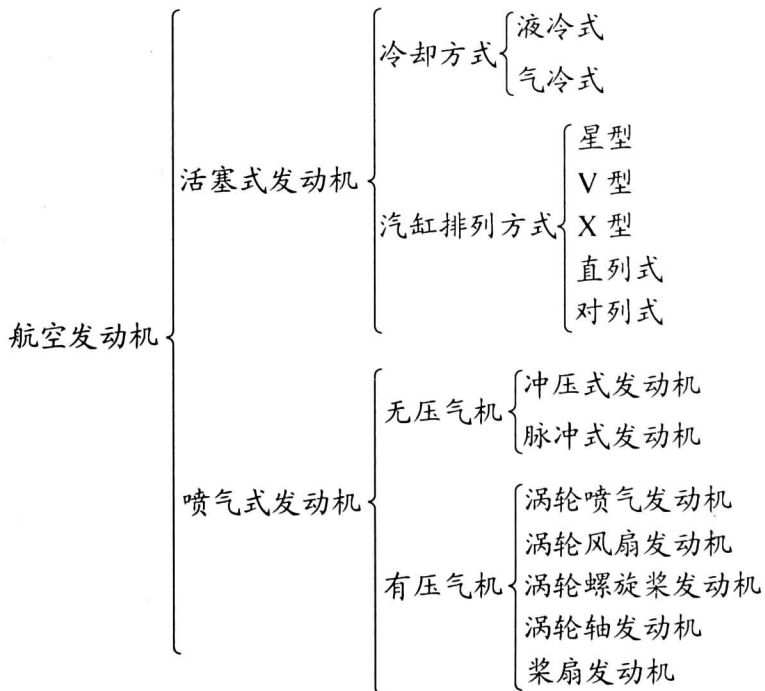


图1-1 航空发动机的分类

目前航空飞行器广泛使用的是上述带有压气机的航空发动机,这一类航空发动机也称为燃气涡轮发动机,因为这一类发动机的压气机都是由燃气涡轮驱动的。

图1-2所示为一台混合排气的双涵道涡轮风扇发动机简图。气体从左前方进入发动机,首先经过风扇被压缩,其总温和总压升高;而后分为内涵和外涵两路,靠近旋转轴的内涵空气,经过高压压气机被进一步压缩,总温和总压进一步升高;高压气体进入燃烧室,与喷油嘴喷入的燃料混合、燃烧,变成高温、高压的燃气;高温、高压的燃气进入涡轮膨胀做功,最后在尾喷管中与风扇后离轴较远的外涵气流混合,并膨胀加速,高速排入大气。尾喷管高速排出燃气,燃气对发动机施以反作用力,推动飞机前进。

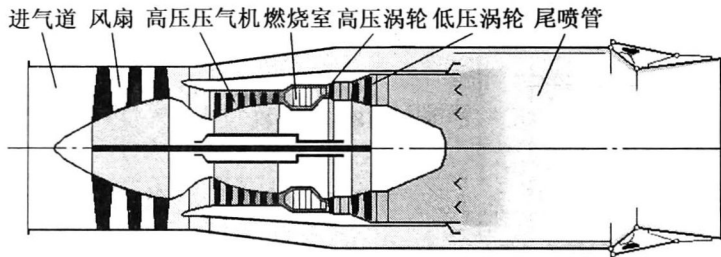
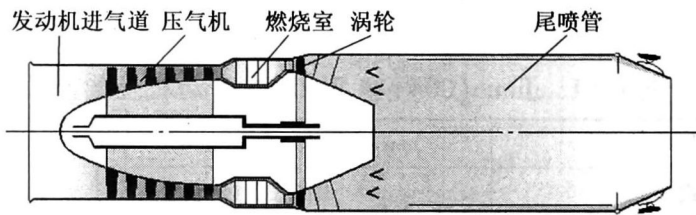
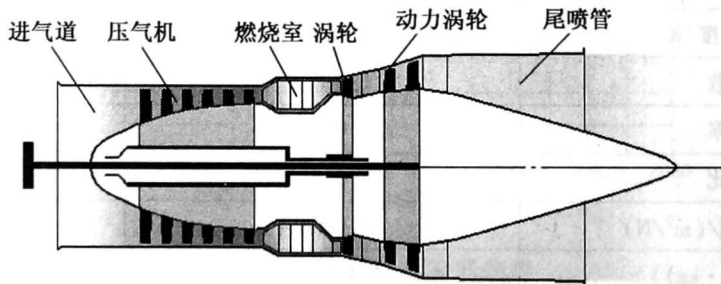


图1-2 混合排气的双涵道涡轮风扇发动机

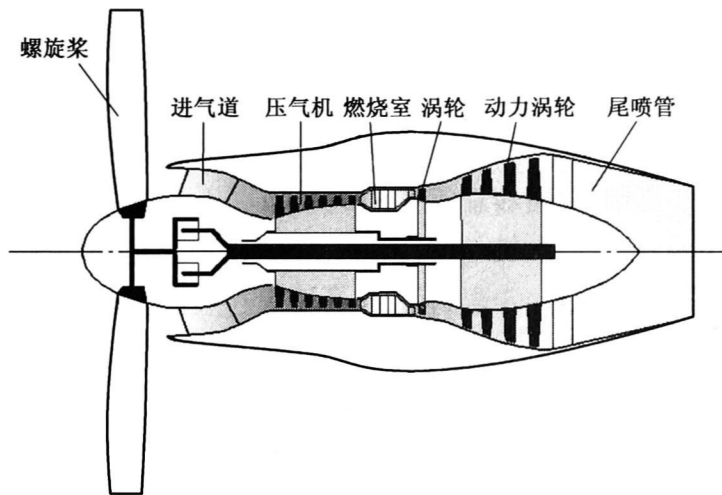
图1-3给出了其他3种形式的燃气涡轮发动机简图。比较这些发动机的结构不难发现,高压压气机、燃烧室和高压涡轮构成了这一类发动机的一个基本单元,其涡轮发出的功正好供给压气机消耗,独自成为一个能量平衡系统,而其作用就是产生一定量的高温、高压燃气,所以被称为燃气发生器。又由于在其基础上,配备不同的部件即可组成各种形式的燃气涡轮发动机,所以又被称为核心机。



(a) 涡轮喷气发动机



(b) 涡轮轴发动机



(c) 涡轮螺旋桨发动机

图 1-3 其他形式的燃气涡轮发动机(续)

在上述燃气涡轮发动机中,风扇、压气机、涡轮和螺旋桨均属于叶片机。简单地从组成燃气涡轮发动机的主要部件中叶片机所占的比例,就不难理解为什么说叶片机是燃气涡轮发动机的主要部件了。对于燃气涡轮发动机来说,叶片机很重要的更为实质的含义在于叶片机的性能好对全台燃气涡轮发动机的性能影响很大,而且叶片机的设计难度大,往往是发动机中设计难度最大的部件。本书的主要研究对象是风扇、压气机和涡轮。

第二次世界大战结束之前,世界上批量生产的仅有两种型号航空燃气涡轮发动机,分别是英国生产的 Welland 发动机和德国生产的 Jumo(004)发动机。Welland 发动机采用单级双侧进气的离心式压气机,而 Jumo(004)发动机的压气机是轴流式的。两种发动机的性能比较见表1-1。

表 1-1 Jumo(004)和 Welland 发动机性能比较

性能指标		Junkers 004B (Jumo 004)	Welland
压 气 机 满 轮	形式	轴流式	离心式
	增压比	3.1	4
	级数	8	1
	效率	0.80	0.75
	进气温度/K	1073	
	级数	1	1
	效率	0.80	0.87
重量推力比		0.83	0.53
单位推力迎风面积/( $\text{m}^2/\text{N}$ )		0.000067	0.000144
耗油率/( $\text{kg}/(\text{h} \cdot \text{kg})$ )		1.40 ~ 1.48	1.12
可靠性		低	高
寿命/h		25 ~ 35	100

然而半个多世纪以来,航空燃气涡轮发动机得到了飞速发展,发展始终沿着高推重比、低油耗、长寿命和高可靠性方向。航空燃气涡轮发动机的推力已由最初的 200 ~ 300daN 发展到现在的 570kN,几乎增大了 200 倍;耗油率由最初的大于  $0.1\text{kg}/(\text{N}\cdot\text{h})$  降到了  $0.035\text{kg}/(\text{N}\cdot\text{h})$ ,降低了约  $2/3$ ;发动机的寿命由最初的几十小时发展到了 2 万小时 ~ 3 万小时;而推重比则由最初的小于 1 发展到了大于 10。图 1-4 和图 1-5 分别显示了航空燃气涡轮发动机耗油率和推重比的发展趋势。

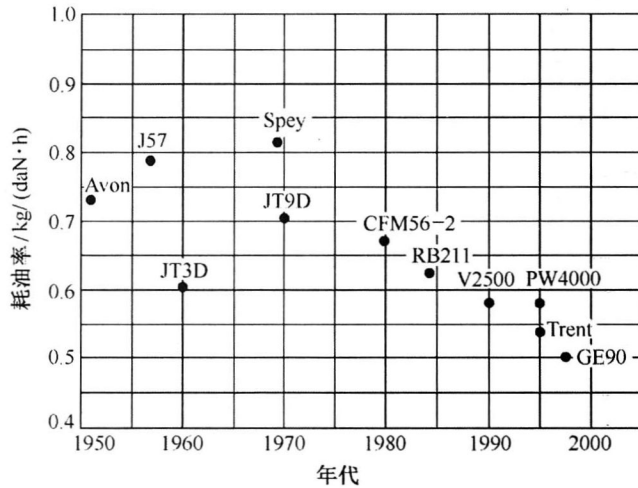


图 1-4 民用发动机耗油率的发展趋势

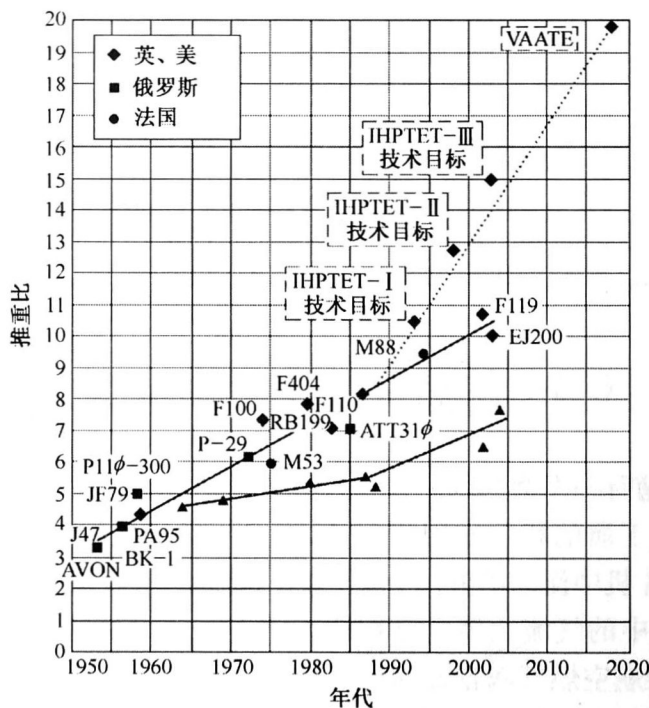


图 1-5 推重比的发展趋势

为了满足航空燃气涡轮发动机的发展需要,航空叶片机的风扇/压气机始终沿着高压比、高速度(包括气流速度和叶轮的旋转速度)和高效,而涡轮沿着高进口温度、高速度和高效率的

方向不断发展。风扇/压气机的总增压比已从20世纪40年代初的3~4发展到现在达25~52。而且为了减少轴向长度和重量,风扇/压气机的级负荷不断增大。涡轮的进气温度从20世纪40年代初的1073K发展到现在的1900K~2000K,并且还出现了超音速涡轮级。表1-2列出了一些现代航空燃气涡轮发动机的压气机和涡轮的主要参数。

表1-2 现代燃气涡轮发动机主要参数

飞机	发动机	发动机形式	压气机				涡轮	
			总增压比	级数		平均级增压比	涡轮前温度/K	级数
				风扇	压气机			
F-111	TF30	涡扇	17	3	12	1.208		1+3
F-15、F-16	F100	涡扇	23	3	10	1.273	1590	2+2
F-18	F404	涡扇	25	3	7	1.380	1650	1+1
B-52	J57	涡喷	14.3		9+7	1.181		1+2
Boeing 747	JT9D	涡扇	22	1	3+11	1.229	1422	2+4
幻影	M53	涡扇	8.5	3	5	1.307	1473	1+1
	M88-3	涡扇	27.7	3	6	1.446	1850	1+1
狂风	RB199	涡扇	24	3	3+6	1.303	1530	1+1+2
米格-29	RD-33	涡扇	23.4	4	9	1.274		
SU-27	AL-31F	涡扇	22.9	4	9	1.272	1650	1+1
	AL-41F	涡扇	29.4				1910	
EF-2000	EJ200	涡扇	26	3	5	1.503	1803	1+1
F-22	F119	涡扇	26	3	6	1.436	1973	1+1
Boeing 777	GE90	涡扇	46	1+3	10	1.313		2+6
	Trent800	涡扇	39.3	1	8+6	1.277		1+1+5
Boeing787	GENx-1B	涡扇	49	1+4	10	1.296		2+7
Boeing747	GENx-2B	涡扇	52	1+3	10	1.326		2+6

## 1.2 航空叶片机的主要类型

风扇、压气机和涡轮有一个共同的特点,就是在旋转的轴或轮盘上装有许多叶片,能量的传输或转换是通过叶片和工质的相互作用实现的,将这一类机械统称为叶片机。在航空叶片机中,通常根据气流在叶片机中流动的方向分类,可分为轴流式、径流式、斜流式和混合式4类。

(1) 轴流式叶片机中的气流大体上是在任意回转面上沿旋转轴的轴线方向流动的,如图1-6所示。现代大中型航空燃气涡轮发动机几乎都采用轴流式压气机。航空燃气涡轮发动机中的涡轮在整个发展历史过程中,也几乎都采用轴流式。

相对于径流式压气机,轴流式压气机具有以下优点:

- ① 迎风面积小;
- ② 适合于多级结构;
- ③ 高压比时效率较高;

- ④ 流通能力强;
- ⑤ 在设计和研究方法上,可以采用叶栅理论。

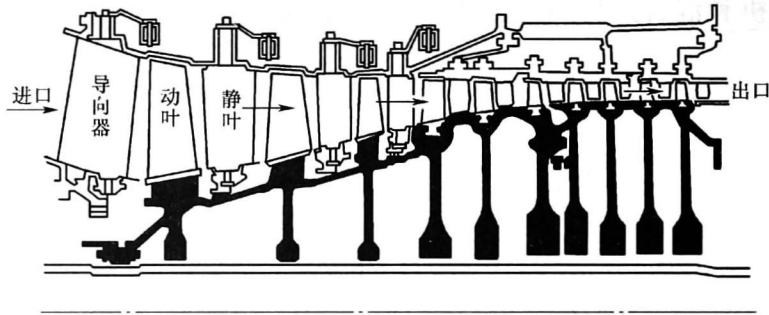


图 1-6 轴流式压气机示意图

(2) 径流式叶片机中的气流大体上是在垂直于旋转轴的平面内做径向流动,如图 1-7 所示。航空燃气涡轮发动机中的径流式压气机一般称为离心式压气机,而径流式涡轮称为向心涡轮。早期的航空燃气涡轮发动机大都采用离心式压气机,目前只在小型涡轮螺旋桨发动机和涡轮轴发动机中才采用离心式压气机。

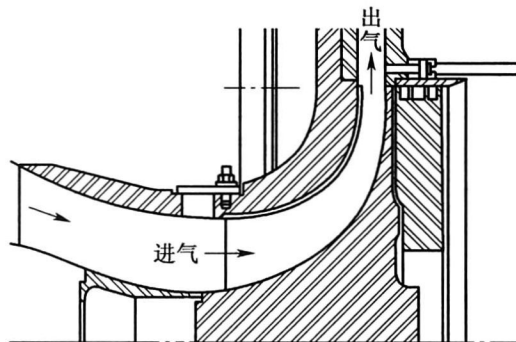


图 1-7 径流式压气机示意图

相对于轴流式压气机,离心式压气机的优点有以下几点:

- ① 单级增压比高;
- ② 构造简单,制造方便;
- ③ 叶片沾污时,性能下降小;
- ④ 轴向长度小;
- ⑤ 稳定工作范围大。

(3) 斜流式叶片机中的气流大致上是在与旋转轴成一倾斜角的回转曲面内流动,如图 1-8 所示。

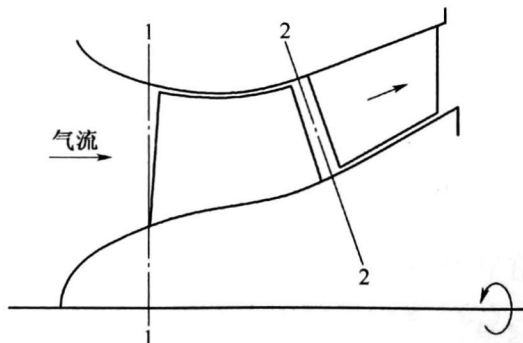


图 1-8 斜流式压气机示意图



(4) 混合式叶片机是指不同形式的级组成的叶片机。在现代航空燃气涡轮发动机的实际应用中,一般是由若干级的轴流式压气机加上一级离心式压气机组成混合式压气机,如图 1-9 所示。斜流式压气机和混合式压气机兼顾了轴流式和离心式压气机的优点与缺点。

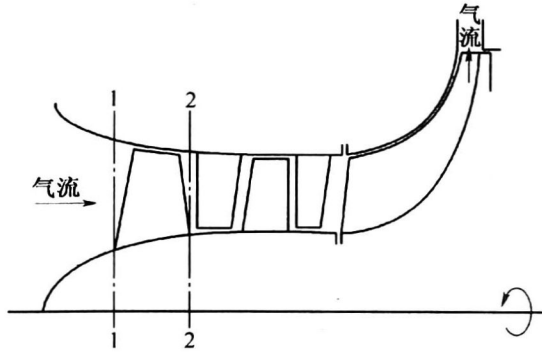


图 1-9 混合式压气机示意图