

21世纪高等学校优秀教材

航空叶片机原理



胡 骏 吴铁鹰 曹人靖 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

21 世纪高等学校优秀教材

航空叶片机原理

胡骏 吴铁鹰 曹人靖 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统介绍了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:第一篇叶片机中的气动热力学基础,包括第一章绪论,第二章叶片机中气体流动的性质和控制方程,第三章一维定常流动的基本方程和热力学图示;第二篇压气机,包括第四章轴流式压气机的工作原理,第五章基元级的基本理论,第六章级的基本理论,第七章多级轴流式压气机,第八章离心式压气机,第九章压气机的特性和调节;第三篇轴流式涡轮,包括第十章轴流式涡轮的工作原理,第十一章基元级的基本理论、第十二章级的基本理论,第十三章多级轴流式涡轮,第十四章涡轮特性,第十五章涡轮冷却。

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,吴铁鹰,曹人靖编著. —北京:国防工业出版社,2006.3

21世纪高等学校优秀教材

ISBN 7-118-04290-0

I. 航... II. ①胡...②吴...③曹... III. 航空发动机:
叶片机—高等学校—教材 IV. V231.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第156678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100044)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 293千字

2006年3月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 20.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

人类实现有动力飞行已有 100 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 100 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。

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风扇、压气机和涡轮。

半个多世纪以来,航空燃气涡轮发动机得到了飞速发展,始终沿着高推重比、低油耗、长寿命和高可靠性方向发展。航空燃气涡轮发动机的推力已由最初的 $1.96\text{kN}\sim 2.94\text{kN}$ 发展到现在的 535.3kN ,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,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 $25\sim 46$,而且为了减少轴向长度和质量,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 $1900\text{K}\sim 2000\text{K}$,并且还出现了超声速涡轮级。

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,作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,并综合了大量的国内外的相关教材和最新科研成果编写了本书。全书共分 3 篇 15 章,第一章 \sim 第七章由胡骏编写,第八章、第九章由曹人靖编写,第十章 \sim 第十五章由吴铁鹰编写。

由于编写者水平有限,难免有不妥之处,敬请读者不吝批评指正。

编者

2005 年 10 月于南京

目 录

第一篇 叶片机中的气动热力学基础

第一章 绪论	1
1.1 燃气涡轮发动机的主要部件	1
1.2 航空叶片机的主要类型	5
第二章 叶片机中气体流动的性质和控制方程	7
2.1 叶片机中气体流动的性质	7
2.2 叶片机中气体流动的控制方程	9
第三章 一维定常流动的基本方程和热力学图示	11
3.1 一维定常流动的基本方程	11
3.2 流动过程的热力学图示	15
思考题和习题	20

第二篇 压气机

第四章 轴流式压气机的工作原理	21
4.1 工作原理	21
4.2 性能参数	23
第五章 基元级的基本理论	25
5.1 基元级	25
5.2 基元级的加功扩压原理	27
5.3 基元级速度三角形及其主要参数	30
5.4 反力度	34
5.5 叶型和叶栅的主要几何参数	37
5.6 平面叶栅的气动参数	39
5.7 平面叶栅风洞试验研究	49
5.8 超声速基元级	59
5.9 压气机叶片叶型	62
思考题和习题	67
第六章 级的基本理论	69
6.1 压气机中的三元流计算概述	69
6.2 完全径向平衡方程	71
6.3 简化径向平衡方程	72

6.4	等环量分布规律	74
6.5	等反力度分布规律	78
6.6	通用规律	81
6.7	级的流动损失	83
6.8	级的增压比和效率	86
	思考题和习题	87
第七章	多级轴流式压气机	89
7.1	多级轴流式压气机的增压比和效率	89
7.2	环壁附面层对轮缘功和流量的影响	92
7.3	轴流式压气机的流程(或通道)形式	94
7.4	气动参数的分配	95
	思考题和习题	99
第八章	离心式压气机	100
8.1	离心式压气机的主要部件及其作用	100
8.2	离心式压气机中气体流动的特点	101
8.3	离心式压气机的流动损失和效率	107
8.4	超声速离心式压气机	108
	思考题和习题	111
第九章	压气机的特性和调节	112
9.1	压气机的工作范围	112
9.2	压气机的流量特性线及其绘制	112
9.3	流量特性线的变化特点	116
9.4	压气机进口总压和总温对流量特性线的影响	119
9.5	相似理论在叶片机中的应用	120
9.6	压气机的通用特性线	123
9.7	压气机中的不稳定流态	125
9.8	叶片机的气动弹性不稳定现象——颤振	130
9.9	进口流场畸变对压气机稳定性和性能的影响	132
9.10	非设计工况下多级轴流式压气机中各级的工作特点	139
9.11	涡轮喷气发动机上压气机发生喘振的条件和扩大稳定区的方法	143
9.12	提高轴流式压气机失速裕度的可能途径	149
	思考题和习题	152

第三篇 轴流式涡轮

第十章	轴流式涡轮的工作原理	153
10.1	涡轮的工作原理	153
10.2	涡轮中气体流动所遵循的能量方程和动量矩方程	154
第十一章	基元级的基本理论	157
11.1	决定基元级速度三角形的主要参数	157

11.2	反力度	158
11.3	气流在涡轮叶栅中的流动	160
11.4	叶型损失及其工程估算	162
第十二章	级的基本理论	167
12.1	级空间的气流组织	167
12.2	级的流动损失	170
12.3	涡轮效率和涡轮功率	171
12.4	单级涡轮气动设计简介	172
第十三章	多级轴流式涡轮	177
13.1	采用多级的原则	177
13.2	主要参数在各级中的分配	177
13.3	多级涡轮的绝热效率	178
第十四章	涡轮特性	181
14.1	涡轮的非设计工作状态	181
14.2	涡轮的相似工作条件	182
14.3	单级涡轮的特性	183
14.4	多级涡轮的特性	185
14.5	涡轮特性线的其他形式	188
14.6	用转动喷嘴环的方法调节涡轮	191
第十五章	涡轮冷却	193
	思考题和习题	195
	参考文献	197

第一篇 叶片机中的气动热力学基础

第一章 绪 论

1.1 燃气涡轮发动机的主要部件

人类实现动力飞行已有 100 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 100 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 100 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。

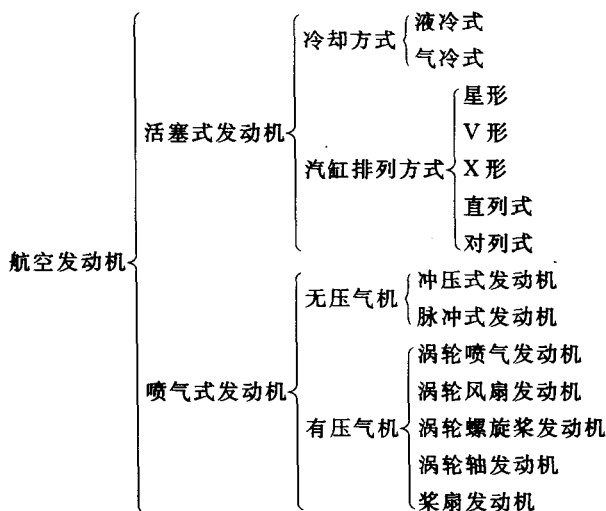


图 1-1 航空发动机的分类

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被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 是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。

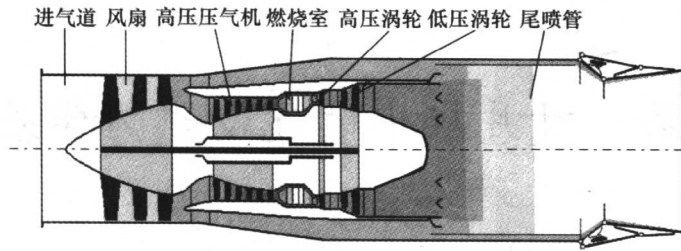


图 1-2 混合排气的双涵道涡轮风扇发动机

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,其高压涡轮

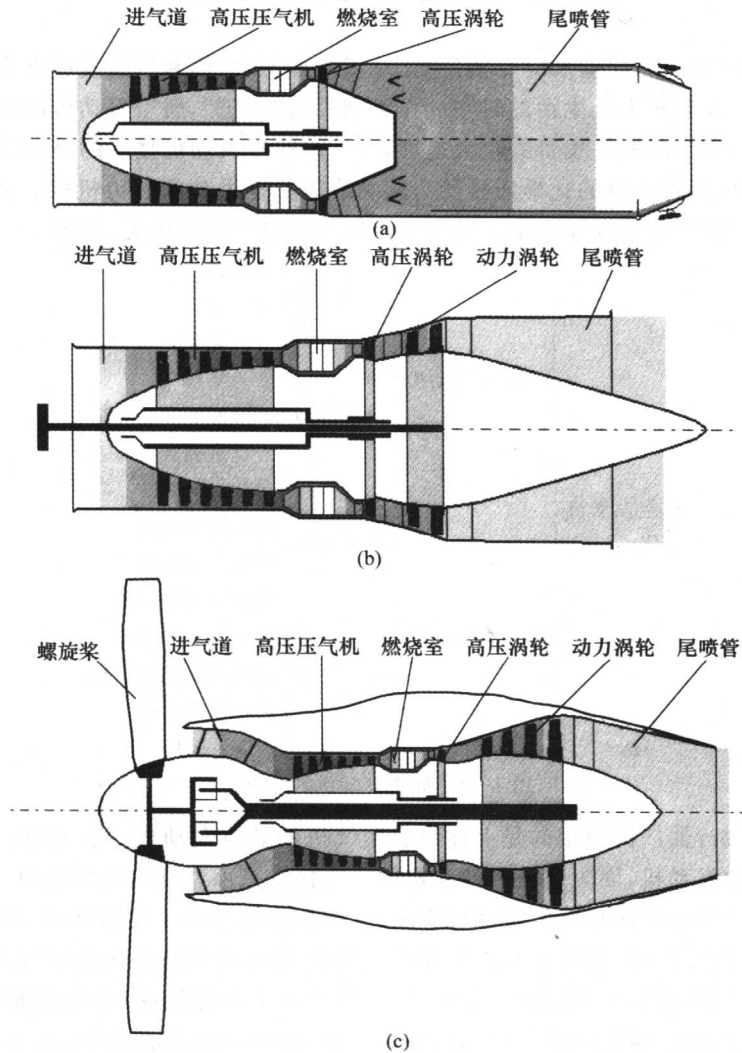


图 1-3 其他形式的燃气涡轮发动机

(a) 涡轮喷气发动机; (b) 涡轮轴发动机; (c) 涡轮螺旋桨发动机。

发出的功正好供给高压压气机消耗,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。

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

发动机性能	Junkers 004B (Jumo 004)	Welland	发动机性能	Junkers 004B (Jumo 004)	Welland
压气机			质量推力比	0.83	0.53
形式	轴流式	离心式	单位推力迎风面积/(m ² /N)	0.000067	0.000144
增压比	3.1	4	耗油率/(kg/h·kg)	1.40~1.48	1.12
级数	8	1	可靠性	低	高
效率	0.80	0.75	寿命/h	25~35	100
涡轮					
进气温度/K	1073				
级数	1	1			
效率	0.80	0.87			

半个多世纪以来,航空燃气涡轮发动机得到了飞速发展,始终沿着高推重比、低油耗、长寿命和高可靠性方向发展。航空燃气涡轮发动机的推力已由最初的 1.96kN~2.94kN 发展到现在的 535.3kN,几乎增大了 200 倍;耗油率由最初的大于 0.1kg/(N·h)降到了 0.035kg/(N·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

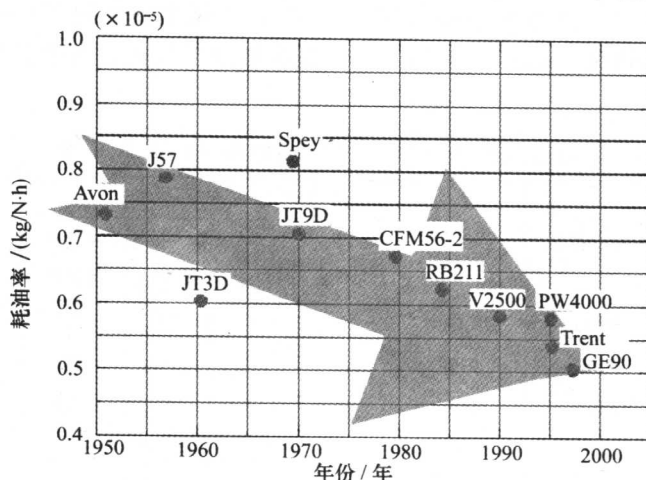


图 1-4 民用发动机耗油率的发展趋势

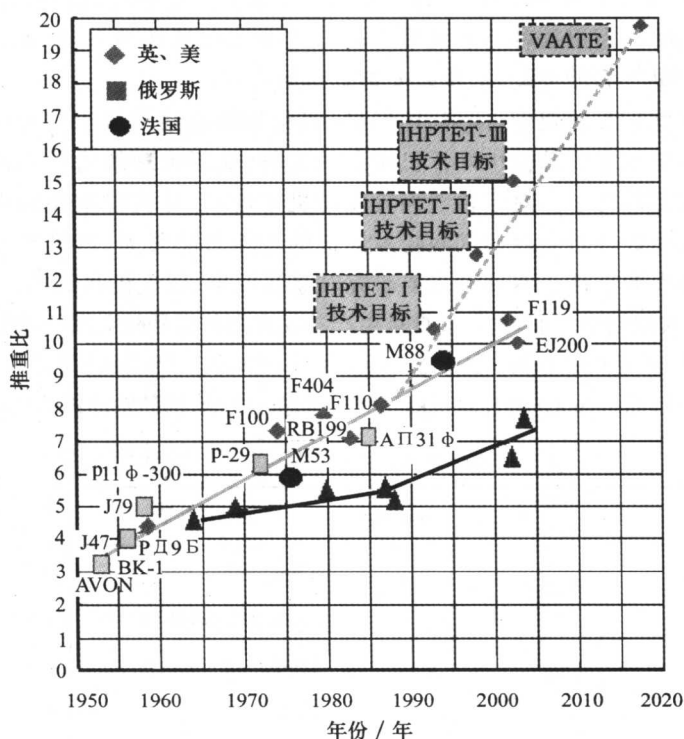


图 1-5 推重比的发展趋势

航空燃气涡轮发动机耗油率和推重比的发展趋势。

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)和高效率方向发展,而涡轮沿着高进口温度、高速度和高效率的方向发展。风扇/压气机的总增压比已从 20 世纪 40 年代初的 3~4 发展到现在的 25~46。而且为了减少轴向长度和质量,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,并且还出现了超声速涡轮级。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 现代航空燃气涡轮发动机的压气机和涡轮主要参数

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

(续)

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			
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	1.315		2+6
Boeing 777	Trent800	涡扇	39.3	1	8+6	1.277		1+1+5

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种。

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。

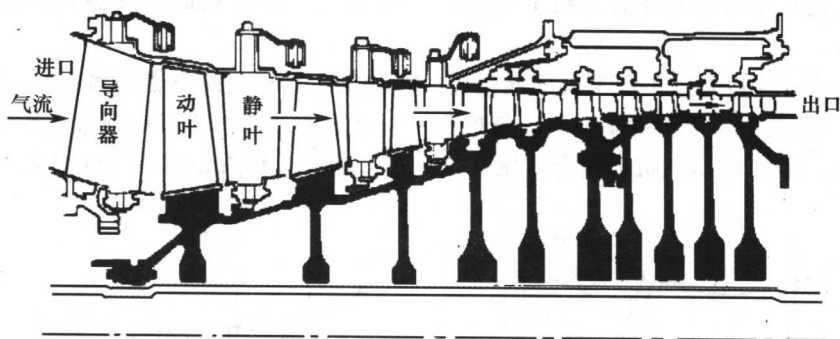


图1-6 轴流式压气机示意图

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。

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作径向流动,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。

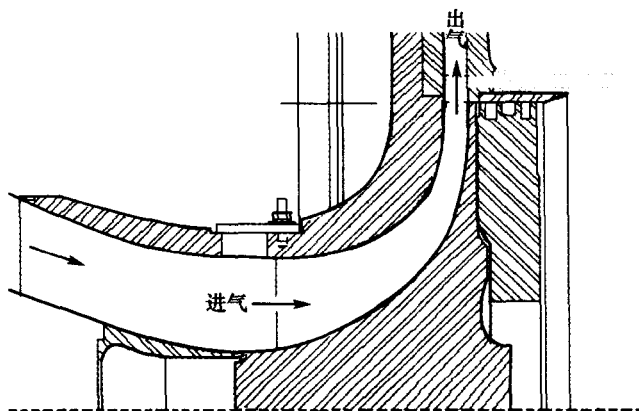


图 1-7 离心式压气机示意图

相对于轴流式压气机,离心式压气机具有以下优点:

- (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。

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。

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。

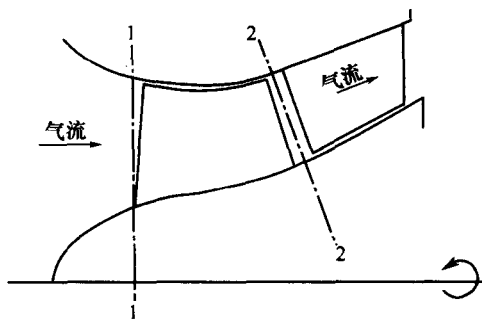


图 1-8 斜流式压气机示意图

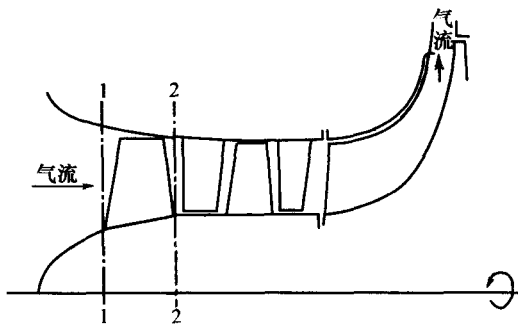


图 1-9 混合式压气机示意图

第二章 叶片机中气体流动的性质和控制方程

2.1 叶片机中气体流动的性质

叶片机是在旋转的轴或轮盘上装有许多叶片,且叶片和流过的工质之间具有能量的传输或转换的一类机械,这类机械的基本功用和结构特点决定了其内部流动的复杂性,这里以轴流式压气机的内部流动为例给予说明。

一、轴流式压气机的结构特点

如图 2-1 所示为一台轴流式压气机纵向剖面简图,在由机匣和轮毂形成的环形流道内存在着沿旋转轴方向顺序排列的若干排叶片。一般情况下均为随转动轴旋转的转子叶排和与机匣连接静止不动的静子叶排交错排列,转子叶片通常也被称为工作轮叶片或动

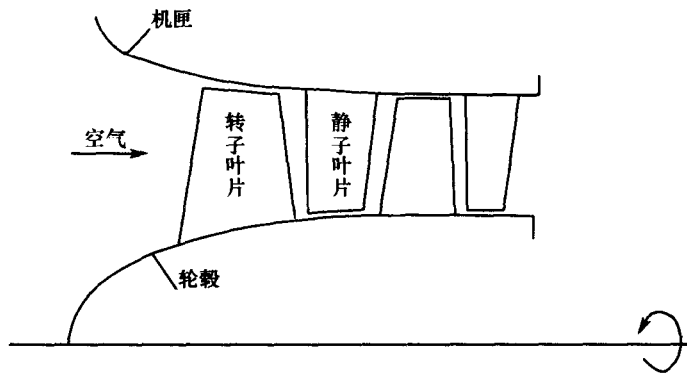


图 2-1 轴流式压气机纵向剖面简图

叶,而静子叶片称为整流器叶片。轴流式压气机的结构特点可归纳如下:

- (1) 旋转的工作轮叶排和静止不动的整流器叶排交错排列;
- (2) 叶排由几何参数相同的叶片沿圆周方向均匀排列形成;
- (3) 工作轮叶排和整流器叶排之间存在轴向间隙;
- (4) 工作轮叶排与机匣之间存在径向间隙。

此外,无论是工作轮叶片还是整流器叶片其叶片表面都是空间曲面,这是由对于压气机的高负荷和高效率等性能要求所决定的。如图 2-2 所示为一个压气机叶片。

二、空间的三维性

1. 径向流动

- 1) 轮毂和机匣形状的影响

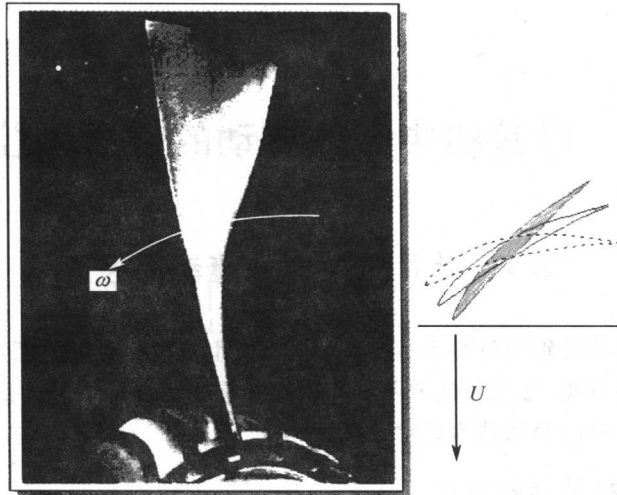


图 2-2 压气机叶片图示

由于轮毂和机匣的曲率较大,在接近轮毂和机匣处的流动存在较大的径向分速度,一般情况下轮毂处的径向分速度 $(C_r)_h > 0$,而机匣附近的径向分速度 $(C_r)_t < 0$,所以沿径向速度变化较大。

2) 叶片作用力的径向分力

压气机叶片沿半径方向是扭曲的,其叶片表面是一个一般的空间曲面,而非径向辐射面,叶片与气流相互作用的力垂直于叶片表面,因而存在一定的径向分力。在此径向分力的作用下,气流产生径向流动和沿径向流动参数的变化。

2. 周向变化

为了能够实现对气流的加功增压作用,压气机叶片两个表面上的气流参数一定不同,只有这样才能形成叶片对气流的作用力,当动叶在力的方向上转动时即可对气流做功,因而在相邻两个叶片组成的一个叶片通道内,沿圆周方向气流参数是变化的。

3. 轴向变化

气流参数沿轴线方向的变化是比较容易理解的,压气机的基本功用就是沿轴向提高气体的压力,而且现代高性能燃气涡轮发动机对压气机的要求,是要在更短的轴向长度内实现更大的增压,所以压力沿轴向的变化很大。为了兼顾压气机其他设计性能的要求,气流的速度和密度等一般也相应地变化较大。

三、黏性和可压缩性

任何实际气体都具有黏性,气流在压气机内部的流动又是一个压力不断上升的逆压力梯度过程,因而在许多流动现象中,黏性起着决定性的作用,无法忽略。

压气机的发展方向之一是“高速”。高速意味着气流的速度和叶轮的切线速度都很大,目前一般风扇/压气机的进口级都为跨声级,也就是说其转子尖部的气流相对 Ma 大于 1.0,有的甚至在 1.6 以上,压缩性的影响显然是必须考虑的。

四、非定常性

气流无论是在压气机转子中流动还是在静子中流动,在静止的绝对坐标系中,都是非定常的。在压气机的转子中,由于在一个叶片通道中气流参数空间分布的周向不均匀,而且该叶片通道还在随转子转动,所以绝对坐标系中某一固定点的参数将随时间周期性的变化。

至于静子内部流动的非定常性就比较容易理解了。一般情况下静子的上游为转子,转子内部参数的不均匀和转子的转动造成了转子出口和静子进口流场的周期性变化,从而使得静子内部流动非定常。

除此之外,压气机内部还存在着如间隙涡、角涡和通道涡等复杂的涡系,以及激波和附面层的相互干扰,动、静叶相互干涉等复杂流动现象。图 2-3 给出了转子叶片通道内复杂的流场结构示意图。

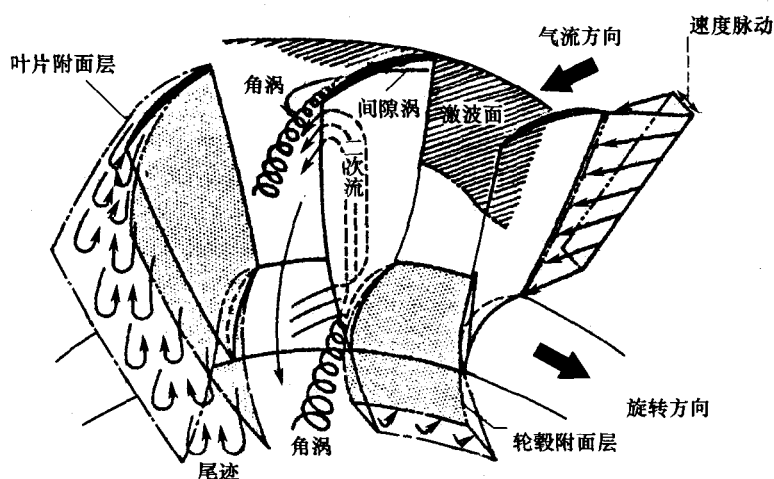


图 2-3 转子叶片通道内复杂的流场结构

2.2 叶片机中气体流动的控制方程

2.1 节以轴流式压气机为例,详细说明了叶片机内部流动的三维、可压缩和非定常性,而且黏性的影响不能忽略。显然,要严格地描述叶片机内部的气流流动规律,就必须采用三维、可压缩、非定常的 N-S 方程、连续方程和能量方程:

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{C}) = 0 \quad (2-1)$$

动量方程

$$\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial t} + (\mathbf{C} \cdot \nabla) \mathbf{C} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{f} \quad (2-2)$$

能量方程

$$\frac{Dh^*}{Dt} = \frac{Dq}{Dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} + f \cdot C + \frac{\Phi}{\rho} \quad (2-3)$$

式中, f 和 Φ 分别为黏性应力和黏性耗散项。

上述方程组虽然严格、准确地描述了叶片机内部流动的规律,但却是含有 4 个独立变量的非线性偏微分方程组。对于叶片机来说,还存在着边界条件和初始条件极其复杂的困难,以及不同长度尺度和时间尺度的影响等。要想直接求解上述方程组完成叶片机性能的优化设计,在叶片机设计理论的发展和目前的计算技术水平方面都将遇到无法克服的困难。所以,在叶片机的发展过程中,也就形成了根据长期的实践经验,结合设计理论的进展,对各种因素进行具体分析,抓住主要矛盾,设法把问题合理地简化到既可以求解,又能尽量好地反映出问题的主要特性的研究方法和设计体系。

目前的叶片机气动设计仍然是设计、分析和改进的交互迭代过程。由于 20 世纪 90 年代中后期全三维 CFD 技术在叶片机气动设计中的成功应用和快速发展,有力地推动了叶片机气动设计体系的发展和完善。可以认为,目前的叶片机气动设计体系是基于平面叶栅理论发展起来的二维或者准三维的设计体系,再辅助以全三维的 CFD 计算分析。从基于实验数据和设计经验的简单的一维程序到理论上相对比较完善的复杂的三维 CFD 程序,在整个叶片机设计流程中都体现着各自的价值,发挥着重要作用。图 2-4 给出了一个目前比较典型的压气机气动设计体系的简图。

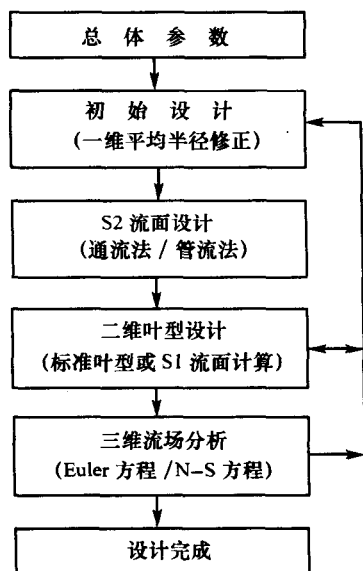


图 2-4 典型的压气机气动设计体系简图