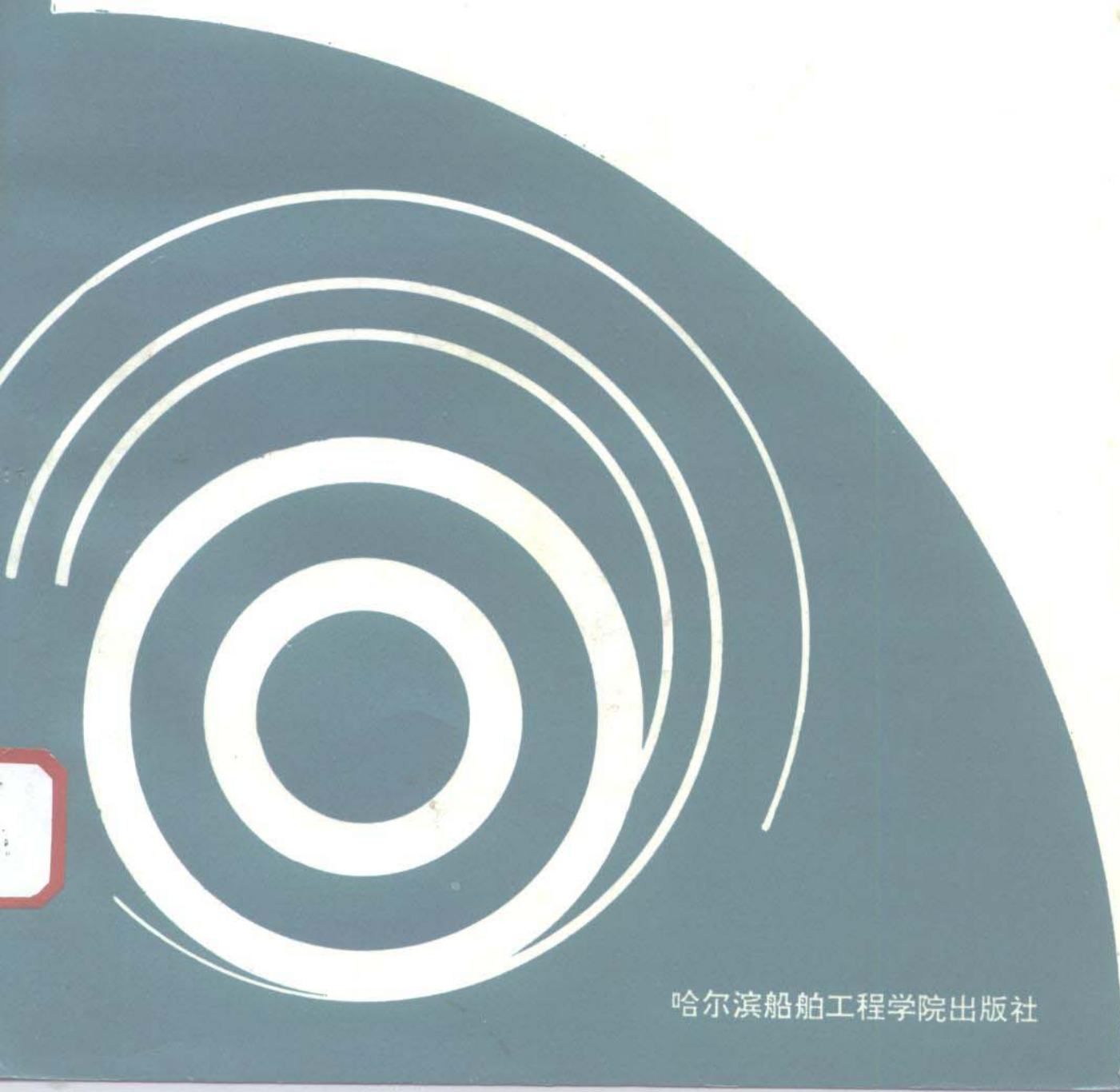


船舶压气机原理

牛利民 编



哈尔滨船舶工程学院出版社

U 664-131
H 50 7.1

船舶压气机原理

牛利民 编

哈尔滨船舶工程学院出版社

(黑) 新登字第 9 号

内 容 简 介

本书应用热力学和气体动力学的一般原理, 讨论船舶燃气轮机中使用的压气机气体流动和能量转换的规律。本书系统地论述了压气机基元级、级和整机的基本工作原理、设计方法和叶栅气体动力学的实验研究; 单级和整机的实验研究; 还研究了以相似理论为基础的变工况性能。也讨论了压气机不稳定工作问题。

本书着重讨论船用压气机有关的特点, 尤其侧重于当前船舶压气机广泛采用的轴流式压气机的介绍。

本书可作为高等院校热力涡轮机专业和其它动力机械、能源等专业高年级本科学生的教材, 也可供有关专业的工程技术人员参考。

船舶压气机原理

牛利民 编

*

哈尔滨船舶工程学院出版社出版
新华书店首都发行所发行
毕升电脑排版有限公司排版
哈尔滨工业大学印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 14.375 字数 330 千字
1993 年 12 月 第 1 版 1993 年 12 月 第 1 次印刷
印数: 1-1000 册

ISBN 7-81007-347-8/U·31

定价: 6.80 元

前 言

本书是根据(1986年)全国高等院校船舶动力类专业教材会议制定的船舶燃气轮机专业中《船舶压气机原理》课程教学基本要求编写而成的。

《工程热力学》、《流体力学》和《气体动力学》是《船舶压气机原理》课程的先导课,学生在学习本课程之前应该对船舶燃气轮机结构有必要的了解。

本书的任务是阐明船舶压气机的基本工作原理、气动设计基础、压气机特性以及不稳定工作等基本理论,并力求结合该领域当前工程设计中新的科研成果和技术进步来丰富、开拓本学科的内容。本课程着重讨论船用燃气轮机中使用的压气机的特点,主要叙述当前广泛采用的轴流式压气机的有关情况。全书共九章。

本书由哈尔滨工业大学秦仁教授和西安交通大学李超俊教授主审。哈尔滨工业大学秦仁教授、中国船舶工业总公司703研究所张春霖高级工程师及哈尔滨船舶工程学院刘顺隆教授对原稿进行了详细的审阅,并提出了很多宝贵意见。在编写过程中,作者得到船舶动力类专业教材委员会副主任杨光升教授、贾锡印教授以及作者的同事李赫教授、刘光宇教授等的大力帮助,在此,谨表示衷心的感谢!

由于水平所限,时间仓促,错误在所难免,殷切希望读者批评指正。

编 者

1992年4月

目 录

第一章 概 述	1
§ 1-1 压气机简介	1
§ 1-2 压气机发展概况以及在船舶燃气轮机中使用的压气机的特点	6
§ 1-3 压气机在国民经济中的应用	8
§ 1-4 《压气机原理》课程的性质、内容和学习方法	10
第二章 热力学与气体动力学的基本方程和基本概念	12
§ 2-1 气体状态方程	12
§ 2-2 连续性方程	13
§ 2-3 运动方程	14
§ 2-4 热焓形式的能量方程	16
§ 2-5 热力学第一定律方程式	18
§ 2-6 机械能形式的能量方程——广义柏努里方程	18
§ 2-7 动量守恒方程——欧拉方程	20
§ 2-8 动量矩方程	21
第三章 轴流式压气机基元级理论	23
§ 3-1 轴流式压气机基元级概述	23
§ 3-2 基元级的速度三角形	24
§ 3-3 基元级对气流的加功增压原理	28
§ 3-4 亚音基元级和超音基元级的扩压流动	31
§ 3-5 亚音基元级中气流参数与坐标系的关系以及气流压缩过程的 $i-s$ 图	33
§ 3-6 基元级的压缩功和效率	36
§ 3-7 基元级的反动度和预旋	41
§ 3-8 基元级的无因次参数和无因次速度三角形	45
§ 3-9 气体绕流叶栅的气体动力方程和基元级最佳效率及流量系数	50
第四章 轴流式压气机平面叶栅实验数据及基元级气动设计基础	58
§ 4-1 平面叶栅的几何参数和气动参数	58
§ 4-2 亚音平面叶栅的实验研究(攻角特性)	61
§ 4-3 霍维尔(Howell)平面叶栅的综合实验数据	64
§ 4-4 美国航空咨询委员会平面叶栅综合实验数据的介绍	69
§ 4-5 平面叶栅几何参数的确定(平面叶栅造型简介)	72
第五章 轴流式压气机的扭向设计	78

§ 5-1	不同半径处基元级共同工作的条件	78
§ 5-2	等环量扭向规律	81
§ 5-3	等反动度扭向规律	88
§ 5-4	沿径向等功、等平均绝对气流角的扭向规律	93
§ 5-5	中间扭向规律	95
§ 5-6	完全径向平衡方程简介	101
§ 5-7	关于叶片叶身设计的简单说明	104
§ 5-8	轴流式压气机超跨音速级的特点	105
§ 5-9	轴流压气机级中的流动损失	112
第六章	多级轴流式压气机	118
§ 6-1	多级轴流式压气机的工作特点	118
§ 6-2	多级轴流式压气机的通流部分形式	124
§ 6-3	多级轴流式压气机的参数选择	125
§ 6-4	多级轴流式压气机的气动计算	128
第七章	离心式压气机	135
§ 7-1	离心式压气机工作概况	135
§ 7-2	气流在进气系统中的流动	139
§ 7-3	气流在工作轮中的流动	142
§ 7-4	气流在扩压器中的流动	159
§ 7-5	离心式压气机的热力计算	165
§ 7-6	超音离心压气机简介	173
第八章	压气机实验和特性	175
§ 8-1	压气机的实验装置和实验中的参数测量	176
§ 8-2	单级轴流式压气机特性	179
§ 8-3	压气机的通用特性曲线	184
§ 8-4	相似理论在压气机实验和设计过程中的应用	189
§ 8-5	压气机特性的计算方法	193
第九章	压气机的不稳定工作	209
§ 9-1	概述	209
§ 9-2	不稳定工况的物理现象	210
§ 9-3	改善多级轴流式压气机特性的方法	217
§ 9-4	颤振介绍	221
参考文献		224

第一章 概 述

压气机作为气体工质的压缩、传输机械，它在国民经济各部门中占有重要地位，特别是在动力、冶金、石油、化工等部门得到了广泛的应用。

压气机是船舶燃气轮机的重要组成部件之一。它的功用是消耗由涡轮部件提供的机械功来压缩空气，提高空气的总压，高效率并连续不断地向燃烧室部件输送足够压力和流量的压缩空气。

按照压缩气体方式的不同，压气机通常分为两大类：(1)是容积式压气机，包括活塞式、螺杆式、罗茨式、涡旋式压气机等；(2)是叶轮机械式压气机。

本书仅研究讨论叶轮机械式压气机的工作原理和特性。在第一章中，将简要介绍叶轮机械式压气机、压气机发展概况及船舶燃气轮机中压气机的特点；压气机在国民经济中的应用等内容。同时，对《压气机原理》课程的性质、内容和学习方法也都做了说明。

§ 1-1 压气机简介

叶轮机械式压气机是一种叶轮旋转式机械。它利用叶轮把原动机的机械能加给气体工质，从而提高气体工质的总压（静压和动能）。这种叶轮机械式压气机习惯上也称之为透平式压气机。

众所周知，叶轮机械是一种具有轮轴（或轮盘）和叶片，用途十分广泛的旋转式机器。从人们日常生活中常见的电风扇，直到工业生产中经常使用的鼓风机、通风机（离心式和轴流式）、叶轮泵（离心泵、轴流泵和混流泵），用于发电的水轮机和汽轮机，用于舰船、航空、发电、机车等动力的燃气轮机、压气机、涡轮，甚至用于船舶、航空推进的螺旋桨等等都属于叶轮机械范围。叶轮机械的共同特点是没有往复运动部件，工作原理是建立在叶轮与工质间的流体动力、能量交换以及在叶轮中的能量转换等基础上的。因而，它适用于高速旋转的工作条件和大功率场合。特别是由于流体力学和气体动力学的新进展，可以使叶轮与工质间的能量交换和转换做到十分有效，流动损失很小，效率较高。

叶轮机械通常分为两类：(1)是对流动的工质加入能量，即本身是消耗功率的机器，如压气机、鼓风机、通风机、泵和风扇等皆属此类。(2)是从流动的工质中获取能量，即本身是获得功率的机器，如水轮机、燃气涡轮、风车、汽轮机等均属这一类。显然，我们的研究对象——叶轮机械式压气机是属于消耗功率的，它消耗了原动机的轴功率，实现了对空气的增压。

叶轮机械式压气机可分为离心式、轴流式和混流式三种型式。

离心式——气体工质在压气机通流部分内大致沿离心方向（半径方向）流动，亦称径

流式。

轴流式——气体工质在压气机通流部分内大致沿转轴平行方向流动。

混流式——气体工质在压气机通流部分内的流动方向既有径向流动,又有轴向流动,它的通流部分由轴流式和离心式两部分组合形成,通常轴流级在前,离心级在后。

叶轮机械式压气机按其压力不同可分为通风机、鼓风机和压气机。

通风机——指压力在 101325N/m^2 , 温度为 293K 状态下, 出口总压值小于 14710N/m^2 (表压) 的叶轮式压气机。

鼓风机——指升压在 $14710\sim 245167\text{N/m}^2$ (表压) 之间的叶轮式压气机。

压气机——指升压大于 245167N/m^2 , 或增压比 (出口压力和进口压力之比) 大于 3.5 的叶轮式压气机。

由于轴流式压气机是在流体力学和气体动力学不断发展的基础上逐步发展和完善起来的, 它具有尺寸紧凑、通流能力强、效率高等优点, 因而在功率为 6000hp (4413kW) 以上的船舶燃气轮机中得到了广泛的应用。

离心式压气机在早期的航空燃气轮机中曾一度被采用, 后来很快被轴流式压气机所取代。目前, 高性能的离心式压气机在小功率船舶、航空和工业燃气轮机中, 因具有结构简单、轴向尺寸小、单级压比大、特性平稳宽广、叶片沾污时性能下降小、不用调节可稳定工作等突出优点, 仍有开发应用价值。近些年来, 巡航船舶燃气轮机以及间冷-回热燃气轮机的开发, 使人们对离心式压气机研制、发展更有了新的兴趣。

实际上在中、小功率燃气轮机上也可以采用混流式压气机, 特别是在间冷-回热燃气轮机中用它很适合。

本书将以轴流式压气机为主, 离心式压气机为辅, 进行讨论和研究。

轴流式压气机主要由两部分组成, 如图 1-1 所示。

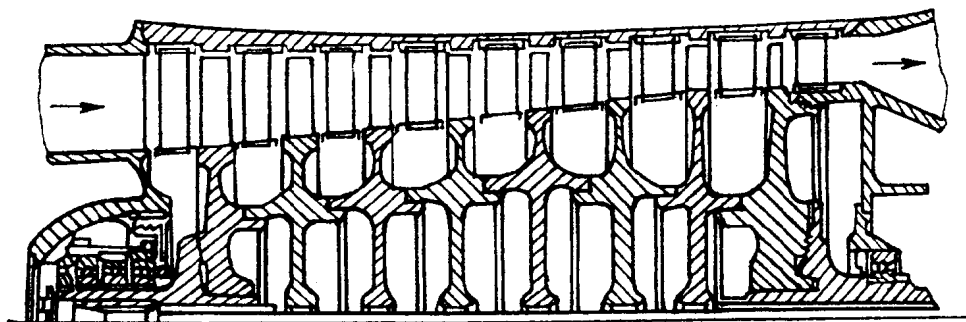


图 1-1 轴流式压气机结构图

在图中, 静子部分为压气机静止不动的部分。通常它由进气管、进口预旋导向器、导向器 (静子叶片环)、出口导向器、出口管和静子机匣等组成。

转子部分为压气机的旋转可动部分。它由轮盘（或轮鼓、鼓盘）以及动叶片环（工作叶片或动叶）和轮轴等组成。压气机的旋转可动部分简称压气机转子或压气机工作轮。

压气机转子和静子的相应元件总和成为压气机的通流部分，通流部分及其功用如下：

1. 进气管

进气管的作用是使外界大气或输气管道中的气体能较均匀地进入压气机进口预旋导向器。气体工质在这里经适当加速，以保证进入预旋导向器前的气流具有均匀的流场。

2. 进口预旋导向器

通常为固定在进气管后部的具有收敛形通流部分的静止环形叶栅。它的作用是使气流在这里加速并获得一定的预先扭转（切向分速），从而保证气流沿叶片高度以一定大小的速度和方向进入压气机第一级工作叶片环。

3. 动叶片环

它由装在轮盘或轮鼓、鼓环上均匀分布的许多工作叶片组成。外界的机械功通过工作叶片传递给气体工质，以增加气体工质的压力和动能。

4. 导向器（静叶）

它由位于动叶之后，均匀固定在压气机静子机匣内环表面上的静子叶片环构成。导向器的功用是将从工作叶片环中流出的气体工质的动能转化成压力能，同时又使气流在进入下一级动叶片之前具有一定的流速和方向。

轴流式压气机都是一级一级地串接起来形成的。虽然气流经过每一个单级的压力升高并不算很大，但多级串接却可以实现所需数值的压力升高。

在轴流式压气机中，每一列动叶片环以及随后的导向器（静子叶片环）合在一起就构成了压气机的一个级。由此可知，级是多级轴流式压气机的基本组成单元。

5. 出口导向器

在最后一级导向器的后面，有时还设置一列导向器，这列导向器称为出口导向器。其功用是使从末级导向器出来的气流转变为轴向流动，以保证气流在燃烧室扩压器内的流动稳定，并提高压气效率。

6. 出口管

船舶燃气轮机压气机的出口管多为直流简单结构。其环形通流部分与燃烧室相适应和配合，把经过增压的空气输送到燃烧室。

离心式压气机也由转子和静子两部分组成，如图 1-2 所示。

在图中，转子部分由轴、导风轮和工作轮等组成。导风轮位于工作轮的前面，与旋转方向前弯的导风轮叶片迎合了相对气流的速度方向，将气流良好地导入工作轮。工作轮将机械功加给工质，气体工质在工作轮叶片间形成的通道中作轴向转径向的复杂运动，增加了气流的压力（静压）和动能（速度）。

静子部分由进气系统、机匣-扩压器和排气管三部分组成。进气系统包括框架、防护网、预旋片、导气盆等构件。预旋片使压气机入口的气流沿叶轮的旋转方向造成一个必要的扭转（切向分速），以减小气体工质进入叶轮的相对速度。导气盆则保证进入的气流均匀地转弯，大体上由径向转成轴向，以减少流动损失。框架为承力结构，也是阻隔外物进入压气机防护网的支承。机匣-扩压器为静子的主要承力件。工作轮与扩压器间的环

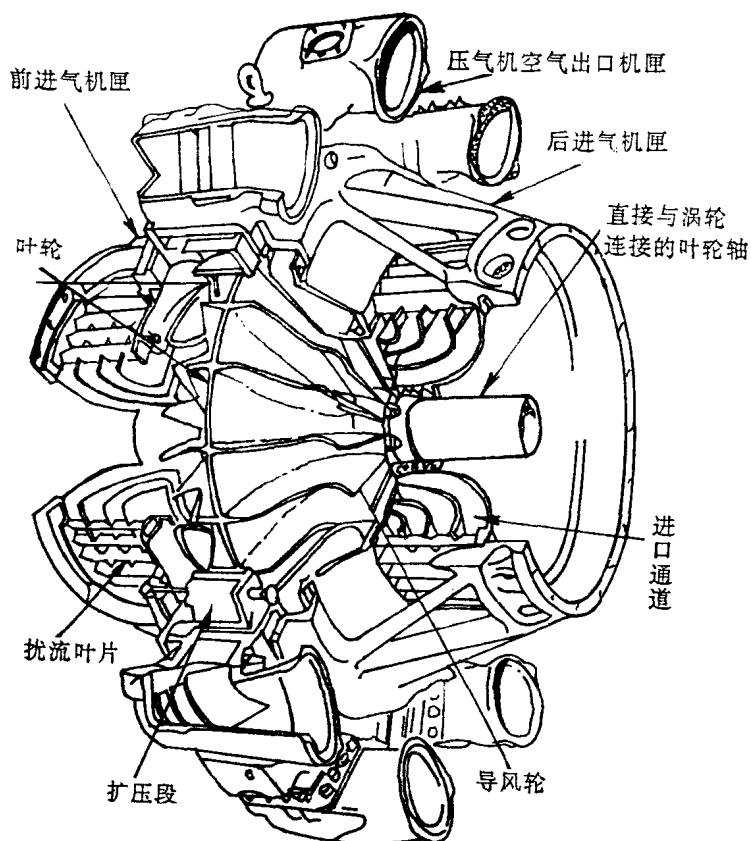


图 1-2 离心式压气机结构图

腔构成了离心压气机的无叶扩压器。气流从工作轮流出进入无叶扩压器和叶片扩压器,实现了气流的减速扩压。排气管连接在叶片扩压器的下游,气流经排气管拐弯并进一步扩压后进入燃烧室。

压气机的主要性能参数有:

(1) 压比 ϵ^*

它是压气机出口处总压 p_z^* 与压气机进口处总压 p_i^* 的比值,即 $\epsilon^* = \frac{p_z^*}{p_i^*}$ 。有时压比也

用静参数表示,即 $\epsilon = \frac{p_z}{p_i}$ 。有的压气机也使用排气压力 p_z 这个指标来代替压比。

(2) 流量 G

它是单位时间内流过压气机任意截面的气体质量。其单位常用 kg/s 表示。有时也采用进气容积流量 V ,但多用于固定式压气机。进气容积流量表示压气机进口截面单位时间内流过的气体容积。其单位常用 m^3/h ; m^3/min ; m^3/s 表示。

(3) 转速 n

指压气机工作轮的旋转速度。其单位表示是 rpm 。

(4) 功率 N

通常指驱动压气机所需要的轴功率。其单位表示是 kW，船舶燃气轮机中的压气机更经常使用的功率单位是马力 (hp)。

(5) 效率 η

效率是表征压气机能量转换的性能指标，通常用绝热效率 η_s 表示。后面将有专门的章节进行详细介绍和讨论。

表 1-1 列出了几种船舶和航空燃气轮机中使用的部分压气机的性能指标。

表 1-1 几种压气机的部分性能指标

燃气轮机型号	压气机类型和级数	压比 ϵ	流量 G (kg/s)	转速 n rpm	国别
船舶 407	单转子 8 级轴流	6.78			中国
船舶 409	单转子 10 级轴流	7.6	20.7	12300	中国
船舶 401-I	单转子 12 级轴流	8.36	52.47	8600	中国
船舶 LM2500	单转子 16 级轴流	17.8	62.8		美国
船舶 LM5000	双转子 低压 5 级轴流 高压 14 级轴流	30	134		美国
船舶 Spey SM1A	双转子 低压 5 级轴流 高压 11 级轴流	17.2	52.44		英国
船舶 RB211	双转子 低压 7 级轴流 高压 6 级轴流	18	84		英国
船舶 ME990	离心式 2 级	12	19.5		美国
航空 Spey	双转子 风扇 5 级轴流 高压 12 级轴流	20.7	55	风扇 8115 高压 12490	英国
航空 RB211	三转子 风扇 1 级轴流 低压 7 级轴流 高压 6 级轴流	26	124	风扇 3530 低压 高压 9392	英国
航空 Turmo 3C	混流 轴流 1 级 离心式 1 级	5.8	5.85	33500	法国
航空 Dart-10	离心式 2 级	6.35	12	15000	英国

§ 1-2 压气机发展概况以及在船舶燃气轮机中使用的压气机的特点

一、压气机发展概况

由于受热力学、机械学和气体动力学发展水平的限制,早期的工业用气体压缩输送机械——通风机和鼓风机多采用容积式结构,如活塞式、罗茨式、滑片式、蜗杆式通风机和鼓风机等。叶轮机械式的气体压缩输送机械是在19世纪才开始应用的。但那时,这种风机的出口总压很低,仅 $98\sim 294\text{Pa}$,效率也很低,仅 $15\sim 25\%$ 。将出口压力大于 343235N/m^2 的叶轮机械式气体压气机真正投入工业使用和发展是近代的事情。近50年来,叶轮机械式压气机技术取得了巨大的进步,迅速发展到今天的高水平,并成为动力、冶金、石油、化工等许多工业部门广泛采用的气体压缩传输机械。

轴流式压气机的基本概念早在100年前就有人提出来了。早期的实验压气机之一就是把一台反动式涡轮反向旋转,实验结果证明效率很低。20世纪初期,英国帕森斯设计并制造了世界上第一台轴流式压气机,它具有19级,流量 $85\text{m}^3/\text{min}$,压力 12100N/m^2 (表压),转速 4000rpm ,效率约 60% 。由于效率低,而没能成功地推广应用。

20世纪30年代,工业蓬勃发展。为迎合航空事业的发展需要,加强了对轴流式压气机的气体动力学理论分析和平面叶栅吹风实验研究,使轴流式压气机的效率提高到 $80\sim 85\%$ 。从40年代开始,轴流式压气机已广泛地应用于航空燃气轮机中,迄今仍占有很重要的地位。现代轴流式压气机的效率可高达 $86\sim 90\%$ 。除在航空燃气轮机中广为使用之外,还广泛地应用于船舶燃气轮机、工业燃气轮机装置及其它工业部门流程中。

20世纪50年代末期,航空工业进入了一个新时代。一方面高空高速飞机对涡轮喷气发动机提出了尺寸小、推力大、特性好的高标准要求;另一方面又诞生和发展了涡轮风扇发动机。这两个方面都极大地促进了轴流式压气机技术的迅速发展,设计研制了高速、高负荷单、双级跨音速风扇;低切线速度、低噪音、高负荷、高效率单级跨音速风扇;高负荷、高速、高效率多级轴流压气机,以及用于小型涡轮风扇发动机和航空燃气轮机的具有管式超音扩压器的高压比离心式压气机等。这些技术进展主要是在下列基础上获得的:

1. 关于压气机内部流动的研究方面

对超、跨音速气体动力学在理论和实验方面取得了很大进步。对超、跨音基元级中气体流动、激波模型有了较好地了解;对叶栅几何尺寸、叶栅形状和激波结构之间的关系以及减弱激波强度的办法均有了比较正确的认识,在此基础上进行了大量的超跨音速压气机和风扇的实验工作,积累了比较多的可供设计时参考的实验资料和经验数据,包括适于高马赫数工作的尖薄叶型、超音速基元级攻角选择及落后角的确定、可供叶片三元流场计算选用的各种经验数据和沿叶高的损失分布模型等。

2. 高速电子计算机的使用

早期压气机的设计,由于受到计算工具的限制,在求解压气机通流部分的气体流动时,不得不作许多简化假设。现在,高速电子计算机的开发和应用,我们有可能使求解

的结果更接近于真实的流动过程,即在超、跨音速级的气动设计中采用考虑通道几何特征、叶片的空间形状和位置、沿叶高焓熵梯度、附面层增厚等因素的三元流场的计算方法。而且,可以使我们能够在几十秒或几分钟内完成压气机的流场计算。无疑,这便于采用优化设计方法进行压气机参数的选择和通道型式等的确定。

关于压气机和风扇设计方面的进展,还体现在对二次流的研究,对展弦比影响压气机特性的研究以及对压气机实验领域中新的测试技术的研究和应用等。船舶、航空燃气轮机中压气机的这些技术进展极大地促进了在国民经济各部门中使用的压气机技术的进步。

但也应当看到,无论在压气机内气体动力学方面,还是在压气机实验技术方面都还存在许多问题需要我们去研究解决。例如流场的计算尚远远不能解决激波与附面层的干扰问题;对风扇和压气机中的二次流动、端面效应等物理过程的了解,涉及这方面效应的工程计算方法也有待进一步提高;多级压气机特性和不稳定边界的计算与实验实测结果相差甚远的问题。此外,压气机实验中级间参数的精确测量问题至今没能得到理想的解决。压气机中流动问题的复杂性,决定了人们要对许多至今仍然不十分明了的技术问题作进一步深入的研究。

二、对压气机气动设计的要求以及船舶燃气轮机中压气机的特点

一般来说,压气机气动设计应满足下述要求:

1. 设计点参数如压比、流量、效率、进口压力和进口温度等,应符合设计技术要求,以保证压气机设计工况时具有良好的气动性能。
2. 具有宽广、稳定的变工况特性。
3. 尺寸、重量和结构布局方面能满足燃气轮机总体结构的要求,并尽可能使结构简单、制造容易、使用方便、安全可靠且成本低廉。
4. 尽可能选定成熟的技术方案,以减少调试工作量,缩短研制周期。

由此可知,这些要求是互相联系,又互相制约的。对于一定的总体结构和总体性能所限定的压气机使用条件,通常也就基本上确定了该压气机的使用技术特点。但最佳气动设计方案的选定,则必须根据具体情况,通过不同技术方案的比较,对各种矛盾的要求作出全面考虑之后,才能最终完成。

船舶燃气轮机中压气机总体结构和总体性能的具体使用条件,事实上就确定了这种压气机的使用技术特点。

(1) 与航空燃气轮机中的压气机相比,船舶燃气轮机中的压气机对尺寸、重量方面的要求没有前者那么苛刻。但与工业燃气轮机中的压气机相比,它还是有比较严格的尺寸、重量要求的。

(2) 与航空燃气轮机中的压气机相比,船舶燃气轮机中的压气机由于船舶推进功率的变化范围大,例如巡航功率通常仅为最大功率的 $1/8$,因而要求具有更好的变工况特性,以保证压气机在宽广的变工况范围内高效率、稳定可靠地工作。当然,这一特殊要求也可以用巡航机组、加速机组联合使用的办法加以解决,但对于全工况使用的船舶燃气轮机而言,压气机部件的气动设计就必须突出在保证功率变化范围大的条件下,具有稳定、经济、可靠工作的变工况特性。

(3) 与航空和工业燃气轮机中的压气机相比, 船舶燃气轮机中的压气机是在海洋环境条件下工作的。空气的密度、湿度大, 又含有大量的盐份, 这首先会造成压气机零部件气动负荷的加大以及燃气轮机止推轴承负荷的加大。其次, 盐份又会造成在压气机通流部分, 特别是压气机叶片表面上的沉积, 并形成硬厚盐层。一方面盐份的沉积会对压气机通流部分元件结构材料表面产生低温腐蚀; 另一方面, 这种沉积硬厚层会改变通流部分的外形, 从而使压气机性能显著地恶化。

(4) 与航空燃气轮机中的压气机相比, 船舶燃气轮机中的压气机还必须能适应最大工况或大工况下较长时间持续使用的要求。特别是还得满足船舶燃气轮机返修寿命比航空燃气轮机长许多倍的具体使用要求 (一般歼击机用航空燃气轮机的返修寿命为 400 小时, 而船舶燃气轮机的返修寿命一般在 8000 小时以上)。

(5) 对于巡航和全工况船舶燃气轮机, 对压气机效率往往提出很高的要求, 以保证燃气轮机的经济性能符合规定的指标。

综上所述, 船舶燃气轮机中的压气机和航空或工业燃气轮机中的压气机有许多不同之处。船舶燃气轮机中压气机气动设计的重点往往是放在保证设计点具有高效率和平稳、宽广良好的变工况特性的前提下, 确保压气机在具有优良的海洋环境条件下的工作适应性、工作可靠性和长寿命。通常为了缩短研制周期、减少调试工作量、结构简单可靠、加工制造方便, 时常采用偏于“保守”的高亚音速级设计的轴流式压气机气动方案。但超跨音级是发展方向, 因而船舶燃气轮机中的压气机采用超跨音级气动设计方案也是势在必行的。由于船舶燃气轮机中使用的压气机在气动设计和使用特点与航空或工业燃气轮机中使用的压气机的不同, 因而, 船舶压气机在气动参数选择和结构设计、材料和表面涂层的选取, 甚至在防喘、进气过滤、通流部分的清洗等均应具有许多特色。

§ 1-3 压气机在国民经济中的应用

叶轮机械式压气机在国民经济各部门中占有重要的地位, 特别是在冶金、石油、化工以及动力等工业部门中获得了广泛的应用。

一、冶金工业

1. 高炉鼓风

在生铁的冶炼过程中, 为了维持高炉内的化学反应, 提高炉内温度, 必须供给炉内大量的空气。对于需用 $3000\text{m}^3/\text{min}$ 以上供风量的大型高炉, 一般采用轴流式压气机, 由电动机或蒸汽轮机驱动。

2. 氧气炼钢

采用纯氧顶吹转炉炼钢, 能使钢铁工业高速度发展, 又可节省建设投资。在炼钢过程中则需要出口压力为 $3138100\text{N}/\text{m}^2$ 左右的氧气压气机。

3. 氧气的制取

近代制氧机械装置中, 氧气是通过分离空气得到的。因为空气中约有 $1/5$ 体积的氧和 $4/5$ 体积的氮, 可以利用它们的沸点不同, 通过精馏中的蒸发冷凝操作把它们分开。为

了实现这个过程，就需要用压气机提高空气压力。例如，低压制氧流程中，需要把空气增压到 588402N/m^2 左右，通常采用轴流加离心的混合式压气机。

二、石油化学工业

1. 化肥

有了合成氨，就可以生产出尿素、硝铵等各种化肥。合成氨由氮气和氢气化合生成。氮气由空气分离或其它方法获得。氢气则由煤、石油、天然气燃烧分解获得。氮气和氢气的混合气体用压气机增压（低压流程为 $1471 \times 10^4\text{N/m}^2$ 左右；中压流程为 $2354 \times 10^4\text{N/m}^2$ 左右；高压流程为 $3138 \times 10^4\text{N/m}^2$ ），然后进入合成塔合成，这些几乎都采用多级离心式压气机。

2. 石油精炼

石油精炼大都分为蒸馏、精炼、裂化、重整等工艺过程。其中裂化和重整这两个工艺过程皆需要对气体进行增压，离心压气机可以满足要求。

3. 石油化工

为了得到化工产品的基础材料丙烯、乙烯、丁二烯、苯等，并将这些原料进一步加工成塑料、纤维、橡胶等，离心式压气机在这些工艺流程中是关键的设备之一。

4. 天然气输送

把处理好的天然气通过管系直接输送至用户，为了克服管系中的压力损失，因此需要天然气输送压气机。这种压气机的排气压力，视管系的长短和气量大小等因素决定，一般为 $19.6 \times 10^4 \sim 78.5 \times 10^4\text{N/m}^2$ 左右。

5. 制冷

压缩制冷无论在石油化工，还是采暖通风等各方面都得到越来越多的应用。压气机是压缩制冷装置的核心设备。用得较多的是离心式压气机。

三、动力工业

1. 燃气轮机

燃气轮机是由压气机、燃烧室和涡轮等部件组成的。采用压气机提高空气的压力并将其输送到燃烧室，在燃烧室内与喷入的雾化燃油混合燃烧形成高温高压的燃气，燃气在涡轮中膨胀作功发出轴功率。压气机作为燃气轮机的重要部件之一，它的性能优劣会直接影响燃气轮机的总体性能。无论船舶、航空或工业大功率燃气轮机皆采用轴流式压气机。而中、小功率的燃气轮机采用离心式压气机或混流式压气机。

2. 内燃机增压

内燃机增压是利用内燃机气缸排出的废气驱动涡轮，此涡轮称为废气涡轮。废气涡轮拖动空气离心式压气机，从外界吸入的空气经此压气机增压后进入内燃机气缸，这样使进入气缸的空气大为增加，注入的燃油量就可相应地增多。对同样尺寸的内燃机组，由于采用了增压，输出功率就能大大提高，一般可提高功率 $50\% \sim 80\%$ ，甚至更多。内燃机增压采用离心式压气机。

3. 动力风源

在机械、建筑、采矿等工业部门中，也广泛采用压缩空气以带动各种风动工具，如风镐、气锤、铆枪等。因此，在这些部门中压气机就成为不可缺少的动力设备。

§ 1-4 《压气机原理》课程的性质、内容和学习方法

《压气机原理》是船舶热力涡轮机及其装置专业教学计划中的专业必修课程。该课程主要讲授船舶燃气轮机中的压气机部件的工作原理、气动设计和特性等。课程从气体动力学和热力学的观点研究气体流经压气机通流部分的全过程,讨论和分析压气机的工作原理和设计原则,压气机的结构、强度、振动、工艺等内容另设专门课程讲授,不包含在本课程范围内。但必须指出,在进行压气机气动设计时,要树立全面观点。如在以气体动力学和热力学的观点考虑叶轮设计时,应同时考虑和兼顾叶轮结构、工艺、强度、振动等方面的要求。

《压气机原理》课程与有关的技术基础课、专业课有密切联系。

压气机和涡轮是燃气轮机的两个基本部件,两者性能的优劣直接影响燃气轮机的性能。《压气机原理》和《涡轮原理》两门课程组成传统的《叶轮机械原理》课程的两大部分,它们之间也有密切的关系。《燃气轮机原理》课程中最关心的是燃气轮机的共同工作线,这就取决于压气机和涡轮的特性,因而《压气机原理》与《燃气轮机原理》密切相关,掌握好前者是学好后者的必要条件。此外,对压气机不稳定工作的分析,还是分析叶片断裂故障的必备知识,因而《压气机原理》与《燃气轮机强度与振动》也密切相关。

关于本课程的学习方法,仅提供下述几点意见,供读者参考:

(1) 应树立和培养实践和辩证的观点

回顾叶轮机械的发展历史可以明显看出,叶轮机械技术是在大量的科学实验基础上发展起来的。没有大量的、系统的平面叶栅吹风实验数据的综合整理,就不可能成功地设计和研制出性能优良的亚音速压气机和涡轮。同样,没有大量的超跨音速压气机单转子和单级实验研究成果,也就不可能设计和研制出现代高性能超跨音速风扇和压气机。再者,新设计的高性能多级压气机几乎全部都是通过实验获得测试数据,经反复修改设计、调试才获得成功的,所有这些,都是因为气体工质在叶轮机械中的复杂流动性质所决定的。实验就是实践的一个重要方面,通过实践找出客观规律,得出理论,这就是我们强调实践观点的理由。

考虑到压气机在各方面的要求,以及这些要求之间的矛盾性质,因此必须树立辩证的观点来决定设计中的取舍问题,以保证设计出的压气机能满足最主要的性能指标要求。

当然,除此而外,对工程性和理论性都很强的《压气机原理》课程而言,树立理论和工程实践相结合的观点也是十分必要的。

(2) 对不同章节的内容,在学习过程中应注意到各有差别

基本原理部分是课程的基础。在学习这部分内容时,应特别注重基本概念的树立和理解以及气流绕流平面叶栅物理图画的分析。对一些最基本的方程更要从物理意义上理解清楚并进行必要的记忆和应用。

气动设计基础部分内容复杂。本书所介绍和讨论的也仅仅是气动设计工作的一部分,因而学习这部分内容时,应善于分析矛盾并抓住主要环节,树立正确的设计思想,也应

学会掌握和占有实验资料和经验数据，并根据具体的设计要求，正确加以运用。应当指出，真正掌握好压气机的气动设计，还有待通过今后的再学习和工作中的反复实践来实现。

关于压气机特性和不稳定工作这部分内容的学习，则应注意工程问题影响因素多和解决问题的途径多样化的特点，要善于分析矛盾，并根据实际的、具体的情况正确选择解决问题的工程方法，切忌思想上的片面性和绝对化。

我们深信读者一定能通过自己的探索和努力，创造出更多更好的学习本课程的方法来。