

热力涡轮机械装置

赵洪滨 编著



清华大学出版社

热力涡轮机械装置

赵洪滨 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书为中国石油大学(北京)“本科教学质量与教学改革工程”重点课程建设项目规划教材。

本书阐述了汽轮机和燃气轮机的工作原理、基本结构和计算方法等。主要内容包括:涡轮机级的工作原理,多级涡轮机,涡轮机在变工况下的工作,蒸汽轮机的凝汽设备,蒸汽轮机调节及保护系统,以及燃气轮机热力循环,压气机基本工作原理,联合循环与系统等。本书适应现代专业教学的要求,引入了汽轮机、燃气轮机及联合循环技术发展的新内容,力求反映现代科学技术在动力透平技术领域的应用与发展,为学生运用现代理论与方法解决实际工程问题提供了基本知识。

本书可作为普通高等院校能源动力类专业动力机械课程的教材,也可供相关专业师生和工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

热力涡轮机械装置/赵洪滨编著.--北京:清华大学出版社,2014

ISBN 978-7-302-36261-6

I. ①热… II. ①赵… III. ①透平机械—高等学校—教材 IV. ①TK05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 077010 号

责任编辑:杨倩

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘玉霞

责任印制:宋林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:19.25 插 页:1 字 数:468千字

版 次:2014年11月第1版 印 次:2014年11月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:46.00元

产品编号:055291-01

前言

FOREWORD

本书是“热能与动力工程专业”新课程体系中的专业技术课教材,其目的是使学生认识和系统了解能源动力工程中汽轮机和燃气轮机的组成、结构、工作原理和性能。本书是中国石油大学(北京)“本科教学质量与教学改革工程”重点课程建设项目的研究成果,是在总结编者相关课程多年教学经验的基础上编写而成的。在编写过程中参考了国内外已有的汽轮机原理、燃气轮机原理等相关教材和国内外有关文献。

能源动力工业是我国国民经济与国防建设的重要基础和支柱型产业,在国家经济建设与社会发展中一直起着极其重要的作用,与此密切相关的热力涡轮机及发展中的新型动力机械对国民经济和工程技术发展起着基础以及重要驱动力的作用。对涡轮动力机械的了解和认识不仅是专业师生而且也是素质全面的工程技术人才必备的技术知识。为使本书适应未来热能与动力工程专业人才培养的需要,在本书的编写过程中,力求衔接基础课程相关知识、突出重点、加强知识的系统性。首先,对汽轮机和燃气轮机的内容进行精心选择,力求对基本结构、基本工作原理的阐述严谨、简明、准确;其次,为了能更好地应用所学的知识,精心选择例题进行示范性分析,同时选编了适量的密切联系工程实际的思考题和习题,由此培养和提高学生的工程观点和理论联系实际、分析问题、解决问题的能力;另外,还将相关技术的最新发展成果反映在教材中,开阔学生的视野,培养学生的创新性思维。

本书共分为10章,前4章主要涉及涡轮机械级的工作原理、多级涡轮机性能以及涡轮机变工况相关内容;第5、6章涉及汽轮机的凝汽设备及调节保护系统;第7、8、9章则对燃气轮机的基本结构、热力学循环和压气机工作过程特点进行了系统描述;在上述基础上,第10章则对先进的各种联合循环及相关技术进行了讨论。本书全部采用国际单位制。本书稿的完成得到了中国石油大学(北京)热能与动力工程专业江婷、杨倩、杨微同学的大力协助,在此致以衷心的感谢。

由于水平和时间所限,书中不足之处,敬请读者批评指正。

编者
2014年9月

变 量 表

符号	意义	单位	符号	意义	单位
ν	运动粘度	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	u	圆周速度	m/s
ρ	密度	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	P_u	轮周功率	W
R	气体常数	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	F_u	气流对于动叶栅在轮周方向的作用力	N
k	气流绝热指数	—	W_u	单位流量的轮周功	J/kg
c_p	气体的定压比热	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	E_0	理想可用能	J/kg
λ	气体的热传导系数	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	η_u	轮周效率	—
c	实际速度	m/s	ζ_n	静叶能量损失系数	—
c_t	理想速度	m/s	ζ_b	动叶能量损失系数	—
G_n	实际流量	kg/s	ζ_θ	扇形损失系数	—
$G_{n,t}$	理想流量	kg/s	$\zeta_{c,2}$	余速损失系数	—
c_c	临界速度	m/s	θ	叶型弯角	°
ρ	密度	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	b	弦长	m
A	截面积	m^2	$\beta_{1,p}$	几何入口角	°
h_o	进入静叶栅比焓	kJ/kg	$B_{2,p}$	几何出口角	°
h_1	进入动叶栅比焓	kJ/kg	t	栅距	m
h_o^*	等熵滞止焓	kJ/kg	γ_p	安装角	°
c	绝对速度	m/s	B	叶栅轴向宽度	m
Δh_n^*	滞止理想比焓降	kJ/kg	a	出口截面宽度	m
Δh_b^*	动叶栅滞止理想比焓降	kJ/kg	i	冲角	°
Δh_b	动叶栅理想比焓降	kJ/kg	δ	偏转角	°
Δh_t	叶高损失	kJ/kg	d/l	径高比	—
Δh_θ	扇形损失	kJ/kg	γ	扩张角	°
Δh_r	部分进气损失	kJ/kg	z_n	级的喷嘴数	个
$\Delta h_{f,w}$	摩擦鼓风损失	kJ/kg	Re	雷诺数	—
Δh_s	斥气损失	kJ/kg	P_f	叶轮因摩擦而消耗的功率	kW
Δh_x	湿气损失	kJ/kg	λ	与工质性质、流动情况有关的系数	—
Δh_3	漏气损失	kJ/kg	P_w	鼓风损失	kW
μ_n	喷嘴的流量系数	—	e	部分进气度	—
μ_b	动叶的流量系数	—	e_h	有护套的弧段占圆周长度的比例	—
φ	喷嘴速度系数	—	m	喷嘴组进出口弧端的对数	对
ψ	动叶速度系数	—	z_p	轴封齿数	个
$\Delta h_{b,\zeta}$	动叶中能量损失	J/kg	μ_p	轴封流量系数	—
Ma	马赫数	—	P_i	级的内功率	kW
ϵ_n	压力比	—	n	涡轮机转速	r/min
ϵ_{nc}	临界压力比	—	η_i	相对内效率	%
β	彭台门系数	—	η_m	机械效率	%
Ω_m	级的反动度	—	η_k	发电机效率	%
H_u	热值	kJ/kg	Ω_p	压力反动度	—
Ω_b	泵浦效应反动度	—			
Ω_h	动叶根部压力反动度	—			

续表

下标	意义	单位	下标	意义	单位
Ω_d	叶轮反动度	—	η_{el}	发电机组的相对电效率	%
Ω_c	抽气效应反动度	—	d	汽耗率	kg/(kW·h)
op	最佳值	—	q	热耗率	kJ/(kW·h)
t	理想		gb	导叶	
c	临界		c_2	余速	
n	喷嘴		1	进口	
b	动叶		2	出口	
θ	扇形		i	涡轮机第 i 级	



第 1 章 绪论	1
1.1 汽轮机的发展	1
1.2 采用汽轮机的热力发电方式	2
1.3 汽轮机系统	4
1.4 燃气轮机的发展	5
1.5 燃气轮机的工作原理.....	11
1.6 本章小结.....	12
第 2 章 涡轮机级的工作原理	13
2.1 气流在基元级内的流动.....	14
2.2 基元级的轮周效率和最佳速度比.....	23
2.3 涡轮机叶片的冷却.....	33
2.4 涡轮机叶栅的几何参数与叶片扭转规律.....	40
2.5 叶栅尺寸的确定.....	52
2.6 级内各项损失和级效率.....	54
2.7 向心涡轮机.....	71
思考题与习题	77
第 3 章 多级涡轮机	79
3.1 多级涡轮机的优越性及其特点.....	79
3.2 蒸汽轮机进汽、排汽损失和热力过程线	87
3.3 多级涡轮机的轴向推力及其平衡.....	89
3.4 轴封及其系统.....	93
思考题与习题	99
第 4 章 涡轮机在变工况下的工作	100
4.1 渐缩喷嘴的变工况	100
4.2 级与级组的工况变化	109
4.3 蒸汽轮机的配汽方式和调节级的变工况	118
4.4 工况变动时各级比焓降、反动度的变化.....	126
4.5 轴向推力的变化	131
4.6 凝汽式蒸汽轮机的工况图	132
思考题与习题.....	135

第 5 章 蒸汽轮机的辅助设备	137
5.1 蒸汽轮机的凝汽设备	137
5.2 蒸汽轮机调节及保护系统	147
思考题与习题	168
第 6 章 蒸汽轮机计算实例	170
6.1 初参数的选择	170
6.2 计算过程	171
6.3 结果	180
第 7 章 燃气轮机热力循环	183
7.1 理想简单循环	183
7.2 实际简单循环	185
7.3 回热循环	191
7.4 复杂循环	192
7.5 闭式循环	196
7.6 燃气轮机热力循环计算方法	197
思考题与习题	206
第 8 章 燃气轮机装置组成及作用	207
8.1 燃气轮机装置组成	207
8.2 压气机	207
8.3 燃烧室	231
思考题与习题	251
第 9 章 汽轮机与燃气轮机的应用	252
9.1 汽轮机的应用	252
9.2 燃气轮机的应用	261
思考题与习题	267
第 10 章 联合循环与系统	268
10.1 蒸汽燃气联合循环的基本类型	268
10.2 联合循环的热力性能	271
10.3 提高联合循环效率的措施	275
10.4 余热锅炉与蒸汽轮机	278
10.5 燃煤联合循环	284
10.6 新的联合循环的应用	287
10.7 燃气轮机多联供系统	290
思考题与习题	297
参考文献	298

第 1 章 绪 论

1.1 汽轮机的发展

公元 1 世纪,亚历山大的希罗记述的利用蒸汽反作用力而旋转的汽转球,又称为风神轮,是最早的反动汽轮机式汽轮机的雏形。1629 年,意大利的布兰卡提出由一股蒸汽冲击叶片而旋转的转轮。1882 年,瑞典的拉瓦尔制成第一台 5hp(3.67kW)的单级冲动式汽轮机。1884 年,英国的帕森斯制成第一台 10hp(7.35kW)的多级反动式汽轮机。1910 年,瑞典的容克斯川兄弟制成辐流的反动式汽轮机。19 世纪末,瑞典拉瓦尔和英国帕森斯分别创制了实用的汽轮机。拉瓦尔于 1882 年制成了第一台 5hp(3.67kW)的单级冲动式汽轮机,并解决了有关的喷嘴设计和强度设计问题。单级冲动式汽轮机功率很小,现在已很少采用。20 世纪初,法国拉托和瑞士佐莱分别制造了多级冲动式汽轮机。多级结构为增大汽轮机功率开拓了道路,已被广泛采用,机组功率不断增大。帕森斯在 1884 年取得英国专利,制成了第一台 10hp 的多级反动式汽轮机,这台汽轮机的功率和效率在当时都占领先地位。20 世纪初,美国的柯蒂斯制成多个速度级的汽轮机,每个速度级一般有两列动叶,在第一列动叶后在气缸上装有导向叶片,将汽流导向第二列动叶。现在速度级的汽轮机只用于小型的汽轮机上,主要驱动泵、鼓风机等,也常用作中小型多级汽轮机的第一级。

1. 国际上汽轮机的发展状况

(1) 1883 年瑞典工程师拉瓦尔设计制造出了第一台单级冲动式汽轮机,随后在 1884 年英国工程师帕森斯设计制造了第一台单级反动式汽轮机,虽然当时的汽轮机和我们现在的汽轮机相比结构非常简单,但是从此推动了汽轮机在世界范围内的应用,被广泛应用在电站、航海和大型工业中。

(2) 在 20 世纪 60 年代,世界工业发达的国家生产的汽轮机已经达到 500~600MW 等级水平。1972 年瑞士 BBC 公司制造的 1300MW 双轴全速汽轮机在美国投入运行,设计参数达到 24MPa,蒸汽温度 538℃,3600rpm;1974 年西德 KWU 公司制造的 1300MW 单轴半速(1500rpm)饱和蒸汽参数汽轮机投入运行;1982 年世界上最大的 1200MW 单轴全速汽轮机在苏联投入运行,压力 24MPa,蒸汽温度 540℃。

(3) 目前世界各国都在研究大容量、高参数汽轮机的研究和开发,如俄罗斯正在研究 2000MW 汽轮机。主要是大容量汽轮机有如下特点:①降低单位功率投资成本。如 800MW 机组比 500MW 汽轮机的千瓦造价低 17%;1200MW 机组比 800MW 机组的千瓦造价低 15%~20%。②提高运行经济性。如法国的 600MW 机组比国产的 125MW 机组的热耗率低 276kJ/kW·h,每年可节约燃煤 4 万吨。加快电网建设速度,满足经济发展需要,

提高电网的调峰能力。

2. 我国汽轮机发展状况

(1) 我国汽轮机发展起步比较晚。1955 年上海汽轮机厂制造出第一台 6MW 汽轮机。1964 年哈尔滨汽轮机厂第一台 100MW 机组在高井电厂投入运行；1972 年第一台 200MW 汽轮机在朝阳电厂投入运行；1974 年第一台 300MW 机组在望亭电厂投入运行。20 世纪 70 年代进口了 10 台 200~320MW 机组，分别安装在了陡河、元宝山、大港、清河电厂。20 世纪 70 年代末国产机组占到总容量 70%。

(2) 1987 年采用引进技术生产的 300MW 机组在石横电厂投入运行；1989 年采用引进技术生产的 600MW 机组在平圩电厂投入运行；2000 年从俄罗斯引进两台超临界 800MW 机组在绥中电厂投入运行。

(3) 上海汽轮机厂是中国第一家汽轮机厂，在 1995 年开始与美国西屋电气公司合作成立了现在的 STC，1999 年德国西门子公司收购了西屋电气公司发电部，STC 相应股份转移给西门子。哈尔滨汽轮机厂 1956 年建厂，先后设计制造了我国第一台 25MW、50MW、100MW 和 200MW 汽轮机，20 世纪 80 年代从美国西屋公司引进了 300MW 和 600MW 亚临界汽轮机的全套设计和制造技术，于 1986 年制造成功了我国第一台 600MW 汽轮机，目前自主研发的三缸超临界 600MW 汽轮机已经投入生产。东方汽轮机厂 1965 年开始兴建，1971 年制造出第一台汽轮机，目前的主力机型为 600MW 汽轮机。北京北重汽轮电机有限责任公司作为后起之秀，以 300MW 机组为主导产品，它是由始建于 1958 年的北京重型电机厂通过资产转型在 2000 年 10 月份成立的又一大动力厂，目前 2 台 600MW 汽轮机也已经在今年投入生产。

(4) 目前中国四大动力厂以 300MW 和 600MW 机组为主导产品。

1.2 采用汽轮机的热力发电方式

1. 火力发电的基本原理

火电厂是利用煤、石油、天然气作为燃料生产电能的工厂，它的基本生产过程是：燃料在锅炉中燃烧加热水形成蒸汽，将燃料的化学能转变成热能；蒸汽压力推动汽轮机旋转，热能转换成机械能；然后汽轮机带动发电机旋转，将机械能转变成电能。

2. 火力发电分类

按燃料分，有：燃煤发电厂，燃油发电厂，燃气发电厂，余热发电厂，以垃圾及工业废料为燃料的发电厂；

按蒸汽压力和温度分，有：中低压发电厂(3.92MPa, 450℃)，高压发电厂(9.9MPa, 540℃)，超高压发电厂(13.83MPa, 540℃)，亚临界压力发电厂(16.77MPa, 540℃)，超临界压力发电厂(22.11MPa, 550℃)；

按原动机分，有：凝汽式汽轮机发电厂，燃气轮机发电厂，内燃机发电厂，蒸汽-燃气轮机发电厂等；

按输出能源分，有：凝汽式发电厂(只发电)，热电厂(发电兼供热)；按发电厂装机容量分，有：小容量发电厂(100MW 以下)，中容量发电厂(100~250MW)，大中容量发电厂

(250~1000MW),大容量发电厂(1000MW以上);

我国目前最大的火电厂:浙江北仑港电厂,装机容量300万kW(即3000MW),5台60万kW(600MW)机组。

3. 火力发电的系统组成

一次风机:干燥燃料,将燃料送入炉膛,一般采用离心式风机。

送风机:克服空气预热器、风道、燃烧器阻力,输送燃烧风,维持燃料充分燃烧。

引风机:将烟气排除,维持炉膛压力,形成流动烟气,完成烟气及空气的热交换。

磨煤机:将原煤磨成需要细度的煤粉,完成粗细粉分离及干燥。

空气预热器:空气预热器是利用锅炉尾部烟气热量来加热燃烧所需空气的一种热交换装置。提高锅炉效率,提高燃烧空气温度,减少燃料不完全燃烧热损失。空气预热器分为导热式和回转式。回转式是将烟气热量传导给蓄热元件,蓄热元件将热量传导给一、二次风,回转式空气预热器的漏风系数为8%~10%。

炉水循环泵:建立和维持锅炉内部介质的循环,完成介质循环加热的过程。

燃烧器:将携带煤粉的一次风和助燃的二次风送入炉膛,并组织一定的气流结构,使煤粉能迅速稳定地着火,同时使煤粉和空气合理混合,达到煤粉在炉内迅速完全燃烧。煤粉燃烧器可分为直流燃烧器和旋流燃烧器两大类。

汽轮机本体:汽轮机本体是完成蒸汽热能转换为机械能的汽轮机组的基本部分,即汽轮机本身。它与回热加热系统、调节保安系统、油系统、凝汽系统以及其他辅助设备共同组成汽轮机组。汽轮机本体由固定部分(静子)和转动部分(转子)组成。固定部分包括气缸、隔板、喷嘴、汽封、紧固件和轴承等。转动部分包括主轴、叶轮或轮鼓、叶片和联轴器等。固定部分的喷嘴、隔板与转动部分的叶轮、叶片组成蒸汽热能转换为机械能的通流部分。气缸是约束高压蒸汽不得外泄的外壳。汽轮机本体还设有汽封系统。

汽轮机是一种将蒸汽的热势能转换成机械能的旋转原动机。分冲动式和反动式汽轮机。

给水泵:将除氧水箱的凝结水通过给水泵提高压力,经过高压加热器加热后,输送到锅炉省煤器入口,作为锅炉主给水。

高低压加热器:利用汽轮机抽汽,对给水、凝结水进行加热,其目的是提高整个热力系统经济性。

除氧器:除去锅炉给水中的各种气体,主要是水中的游离氧。

凝汽器:使汽轮机排汽口形成最佳真空,使工质膨胀到最低压力,尽可能多地将蒸汽热能转换为机械能,将乏汽凝结成水。

凝结泵:将凝汽器的凝结水通过各级低压加热器补充到除氧器。

油系统设备:一是为汽轮机的调节和保护系统提供工作油,二是向汽轮机和发电机的各轴承供应大量的润滑油和冷却油。主要设备包括主油箱、主油泵、交直流油泵、冷油器、油净化装置等。

在发电厂中,同步发电机是将机械能转变成电能的唯一电气设备。因而将一次能源(水力、煤、油、风力、原子能等)转换为二次能源的发电机,现在几乎都是采用三相交流同步发电机。在发电厂中的交流同步发电机,电枢是静止的,磁极由原动机拖动旋转。其励磁方式为发电机的励磁线圈FLQ(即转子绕组)由同轴的并激直流励磁机经电刷及滑环来供电。同步发电机由定子(固定部分)和转子(转动部分)两部分组成。定子由定子铁芯、定子线圈、

机座、端盖、风道等组成。定子铁芯和线圈是磁和电通过的部分,其他部分起着固定、支持和冷却的作用。

转子由转子本体、护环、心环、转子线圈、滑环、同轴激磁机电枢组成。

主变压器:利用电磁感应原理,可以把一种电压的交流电能转换成同频率的另一种电压等级的交流电的一种设备。

6kV、380V 配电装置:完成电能分配,控制设备的装置。

电机:将电能转换成机械能或将机械能转换成电能的电能转换器。

蓄电池:指放电后经充电能复原继续使用的化学电池。在供电系统中,过去多用铅酸蓄电池,现多采用镉镍蓄电池

控制盘:有独立的支架,支架上有金属或绝缘底板或横梁,各种电子器件和电器元件安装在底板或横梁上的一种屏式的电控设备。

1.3 汽轮机系统

1. 汽轮机系统基本组成

汽轮机是以蒸汽为工质的将热能转变为机械能的旋转式原动机,主要系统包括主蒸汽、再热蒸汽系统,高低压旁路系统,轴封蒸汽系统,辅助蒸汽系统,真空抽汽系统,凝结水系统,给水系统,循环水系统,汽轮机油系统,汽轮机调节以及保安系统,发电机冷却系统和密封油系统,压缩空气系统等。

2. 汽轮机基本组成

汽轮机由静止部分和转动部分组成;静止部分包括气缸、隔板、喷嘴和轴承等;转动部分包括轴、叶轮、叶片和联轴器等,此外,还有汽封和盘车装置。

3. 汽轮机分类及型号

汽轮机可按照工作原理、热力特性、主蒸汽压力等分成不同的种类。

(1) 汽轮机按照工作原理分为冲动式汽轮机和反动式汽轮机。冲动式汽轮机蒸汽主要在静叶中膨胀,在动叶中只有少量的膨胀。反动式汽轮机蒸汽在静叶和动叶中膨胀,而且膨胀程度相同。由于反动级不能作成部分进汽,因此第一级调节级通常采用单列冲动级或双列速度级。如我国引进美国西屋(WH)技术生产的 300MW、600MW 机组。目前世界上生产冲动式汽轮机的企业有:美国通用公司(GE)、英国通用公司(GEC)、日本的东芝(TOSHIBA)和日立、俄罗斯的列宁格勒金属工厂等。制造反动式汽轮机的有美国西屋公司(WH)、日本三菱、英国帕森斯公司、法国电器机械公司(CMR)等,德国西门子(SIEMENS)。冲动式汽轮机为隔板型,如国产的 300MW 高中压合缸汽轮机;反动式汽轮机为转鼓型(或筒型),如上海汽轮机厂引进的 300MW、600MW 汽轮机。

(2) 汽轮机按照热力特性分为凝汽式汽轮机(蒸汽在汽轮机中膨胀做功后,进入高度真空状态下的凝汽器,凝结成水)、背压式汽轮机(排汽压力高于大气压力,直接用于供热,无凝汽器)、调整抽汽式汽轮机(从汽轮机中间某几级后抽出一定参数、一定流量的蒸汽(在规定的压力下)对外供热,其余排汽仍排入凝汽器。根据需要,有一次调整抽汽和二次调整抽汽之分、中间再热式汽轮机(蒸汽在汽轮机内膨胀做功过程中被引出,再次加热后返回汽轮机

继续膨胀做功)。

(3) 汽轮机按照主蒸汽压力分为: 低压汽轮机——主蒸汽压力小于 1.47MPa; 中压汽轮机——主蒸汽压力为 1.96~3.92MPa; 高压汽轮机——主蒸汽压力为 5.88~9.8MPa; 超高压汽轮机——主蒸汽压力为 11.77~13.93MPa; 亚临界压力汽轮机——主蒸汽压力为 15.69~17.65MPa; 超临界压力汽轮机——主蒸汽压力大于 22.15MPa; 超超临界压力汽轮机——主蒸汽压力大于 32MPa。由于冶金技术的不断发展, 汽轮机结构也有了很大改进。目前的大机组普遍采用了高中压合缸的双层结构, 高中压转子采用一根转子结构, 高、中、低压转子全部采用整锻结构, 轴承较多地采用了可倾瓦结构。目前各国都在进行大容量、高参数机组的开发和设计, 如俄罗斯正在开发的 2000MW 汽轮机。日本正在开发一种新的合金材料, 将使高中、低压转子一体化成为可能。

(4) 此外, 汽轮机按汽流方向可分为轴流式、辐流式、周流式汽轮机; 按用途可分为电站汽轮机、工业汽轮机、船用汽轮机; 按气缸数目可分为单缸、双缸和多缸汽轮机; 按机组转轴数目可分为单轴和双轴汽轮机; 按工作状况可分为固定式和移动式汽轮机等。

汽轮机的型号有: N—凝汽式; B—背压式; C—一次调整抽气式; CC—两次调整抽气式; CB—抽泣背压式; CY—船用; Y—移动式; HN—核电汽轮机。

1.4 燃气轮机的发展

1. 燃气轮机现状及趋势

1) 燃气轮机的现状

(1) 机组的功率和效率

燃气轮机自 1939 年使用以来, 机组功率与效率提高得很快, 现单机最大功率为 334MW, 简单循环机组效率最高的则达 42.9%, 功率为数千千瓦的简单循环小型机组效率已普遍达到 30% 以上, 近年来采用回热循环的数十至数百千瓦的微型燃气轮机效率也已达到 30%, 完全改变了以往认为燃气轮机效率低的看法。至于联合循环的效率最高已达 58%。因此, 当今的燃气轮机堪称高效率的热机。

(2) 环保性能

如何保护环境是当今社会发展的一个重大课题, 必须在发展时高度重视这一问题, 应尽可能减小对人类健康有害的污染物的排放。对于热机来说, 主要是 NO_x 、CO 和 SO_x 等的排放。燃气轮机大多燃用天然气, SO_x 排放趋于零, 且在对燃料在燃烧室中的燃烧过程采取措施后, NO_x 和 CO 排放也可降至很低的水平, 例如采用催化燃烧, NO_x 的排放浓度低于 $20\text{mg}/\text{m}^3$, 故燃气轮机是污染排放很低的热机, 能很好地满足环保的要求。

(3) 可靠性

燃气轮机结构紧凑, 为高速回转机械, 无往复运动部件, 运行平稳, 设备较少, 系统较简单, 使运行有很高的可靠性。燃料用天然气和带基本负荷的燃气轮机, 可靠性可达 99%, 相应地联合循环的可靠性可达 96%, 远高于蒸汽动力装置。

(4) 应用现状

燃气轮机首先在航空领域中的应用占绝对优势, 早在 20 世纪 50 年代就基本取代了活

塞式发动机作为飞机推进动力,使飞机的性能得到了很大的提高,出现了超声速飞机、洲际航行飞机和载重达数百吨的巨型飞机。实用的航空发动机有涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、涡轮螺桨发动机和涡轮轴发动机等四种。前两种为喷气推进,后两种为输出轴功率。除涡轮轴发动机用于直升机外,其余三种用于一般飞机,其中涡轮风扇发动机由于推进效率高、油耗率低,应用最广泛。为使航空发动机达到很高的性能以提高飞机性能,在研制时尽可能地发展和应用先进技术,故航空发动机效率高。当改型为地面用燃气轮机时,虽为了提高寿命要降低燃气初温和转速保持了效率高的特点。可以这样说,航空发动机的发展领先于地面燃气轮机,它的先进技术常被移植到地面燃气轮机设计中,有力地促进了燃气轮机性能的不断提高。

燃气轮机不仅效率高,且起动快、能快速适应负荷需求的变化,用于电站发电时,可用作带基本负荷、调峰运行和备用机组。燃气轮机还能方便地实现不需外界电源的黑箱起动,使在电网出现故障供电中断时,备用的燃气轮机发电机组可独立地紧急起动投运,向需保证供电的部门供电。燃气轮机不仅适用于大型中心电站发电及电网供电,还适用于无电网的地区孤立运行发电。例如我国某偏远地区的石化基地远离电网,其建立了由三台 11MW 燃气轮机组成的热电站,供给整个基地的生产、生活用电和所需的蒸汽,确保了该基地的正常生产和生活。由于燃气轮机和联合循环电站发电效率高、污染排放低、可靠性高、建设周期短,在国外其造价远低于燃煤的蒸汽电站,因而其在各类电站中所占的比重不断加大。美国在 20 世纪 80 年代,燃气轮机的年生产容量就超过了汽轮机。目前,全世界发电设备年定购容量,燃气轮机与联合循环之和大体与汽轮机相当。而在一些工业发达的国家中,如美国和德国等,则是燃气轮机和联合循环之和超过了蒸汽轮机。因此,燃气轮机和联合循环发电在世界范围内已成为电力工业中的主力军。

天然气管道输送的增压站中,用以驱动天然气压缩机的增压机组的燃气轮机,在 20 世纪 60 年代已被公认为最佳的动力,如今的应用已占绝对优势。在大容量的原油管道输送中,用燃气轮机驱动增压原油的离心泵机组,也获得了大量应用。

在石油和化工等工业部门,大量应用燃气轮机来驱动泵、压缩机和发电机等。为提高能源利用率,实现节能,还利用燃气轮机的高温排气热量在余热锅炉中产生蒸汽来供热,实现热电联供满足生产的需要,进而还可以实现热电冷三联供以更有效地利用能源。

20 世纪 60 年代,轻型燃气轮机被确认为军舰用的最佳动力,此后在排水量为数千吨的驱逐舰、护卫舰等大型军舰中被广泛应用,同时气垫船等亦大量应用燃气轮机。近年来,以轻型燃气轮机驱动喷射水泵喷水推进,航速达到 40~60 节(1 节=1.85km/h)的高速渡船,因营运效益好而应用发展很快,在我国香港就有多艘这种渡船在营运中。

在军用车辆中燃气轮机的应用也有较大的发展前途,已用于某些主战坦克中,如 M1 和 T-80 坦克。因民用车辆更着重经济性,要求有较低的平均油耗率,故燃气轮机的应用尚处于试验阶段。

综上所述,可看出燃气轮机是高效率、低污染、可靠性很高和应用面很广的热力机械,已成为热机中的一支劲旅。

2) 燃气轮机的发展趋势

(1) 进一步提高性能

燃气轮机的发展中重要的是进一步提高机组效率。自 1939 年燃气轮机实用以来,简

单循环机组效率从 18% 提高到如今最高达 42.9%，进展巨大，这与燃气初温从当时的 550℃ 提高到如今的 1200~1430℃ 密不可分。图 1.1 为燃气初温与机组效率逐年提高的情况，可看出两者变化趋势一致。

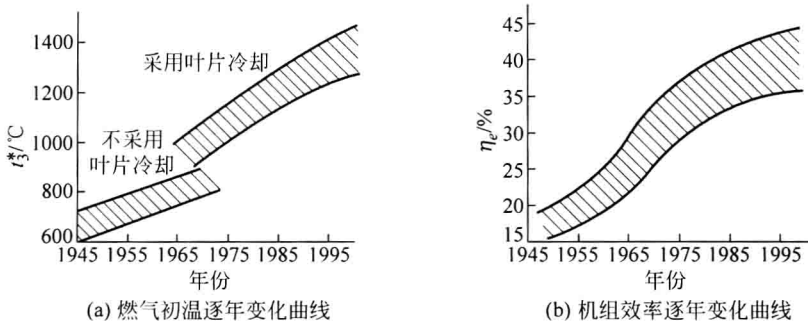


图 1.1 燃气初温与机组效率的逐年提高

图中的涡轮机叶片冷却是指将涡轮机叶片设计成内部有冷却空气流道的“空心”叶片，用空气冷却来降低叶片的工作温度使之可在更高的燃气初温下运行。从图看出，当在 20 世纪 60 年代涡轮机采用叶片冷却后， t_3 出现了跳跃，相应地 η_e 也出现了跳跃，说明涡轮机采用叶片冷却对提高机组效率是十分有效的。以涡轮机采用叶片冷却前后为分界线，之前 t_3 的逐年提高仅由研制新的叶片用高温材料来实现，之后 t_3 的逐年提高则是由研制新的高温材料与改进叶片冷却技术两者共同来实现。实践证明，改进叶片冷却技术对 t_3 提高的速度明显高于高温材料改进对 t_3 提高的速度，因而涡轮机采用叶片冷却后 t_3 逐年提高的速度明显加快，见图 1.1。

目前，燃气初温超过 1500℃ 的航空发动机已投运，燃气初温达到 1700℃ 的涡轮机研制工作已在进行。因此，简单循环机组效率达到并超过 45% 的日子已指日可待。

应指出机组效率的提高还与压气机和涡轮机的效率提高有关，随着技术的进展，今后压气机和涡轮机效率将继续提高，从而促进机组效率更多地提高。

显然，提高机组性能应是全面的，即在提高机组效率的同时应保持其他良好的性能并一同加以提高，特别是随着燃气初温的不断提高，机组仍要有高的可靠性和长寿命是十分重要的，这要求在结构设计、材料和制造工艺等方面配合，不断改进，并在机组运行中进行考核使之不断完善。

(2) 大力发展联合循环

鉴于联合循环效率最高已达到 58% 的高水平，因而在电站中纷纷采用联合循环来降低能耗。其次由于主要燃用天然气还可以减小温室气体 CO_2 的排放。目前，功率为 480MW 的、燃气轮机中涡轮机叶片采用蒸汽冷却的联合循环即将投运，其效率可达 60%。预测今后联合循环的效率将达到 70%~75%。因此，大力发展联合循环是必然的趋势。

在大力发展常规的燃用天然气的联合循环的同时，还应发展燃煤的联合循环，其中首要的是整体煤气化联合循环 (IGCC)，它不仅效率高，且污染排放很低，是当今发展洁净煤技术的一个重要方面。现世界上已有多座 IGCC 电站投运，功率为 95~300MW，效率达 40%~45%，高于燃煤的蒸汽电站。目前 IGCC 电站主要的问题是电站造价比燃煤的蒸汽电站高不少。故今 IGCC 的发展除提高效率外，一个重要的课题是降低电站造价。预期再过十余

年 IGCC 电站的效率将达到 50%，造价可望降至与燃煤蒸汽电站相同水平，届时将建造大量 IGCC 电站。

另一是应发展增压流化床燃煤联合循环(PFBC-CC)，现已有多座这种电站投运，其污染排放也很低，效率与燃煤的蒸汽电站相当，电站造价则高于燃煤的蒸汽电站很多。PFBC-CC 适用于改造已投运多年的老的蒸汽电站，以提高电站效率和降低污染排放。预期今后发展新一代的 PFBC-CC 电站的效率也能达到 50%。此外亦需降低其造价。

(3) 研究发展新型热力循环

这里所指的是由燃气轮机组成的热力循环，目的是提高效率或在达到高效率的同时降低机组的造价。有湿空气涡轮机(HAT)循环和燃料电池联合循环等。

(4) 扩大应用

首先是扩大在已大量使用领域中的应用，其中主要是发电部门。由于燃气轮机特别是联合循环的效率已达到很高的水平，污染排放又很低，已在电力工业中得到广泛的应用，可说是风头正劲，在今后必将以更快的速度发展。美国电站数据研究院(UDI)预测，从 1999 年至 2008 年的 10 年内，全世界电站装机容量将增加 695GW，按燃料类型分：燃煤机组占 27%，燃用天然气和液化天然气(LNG)机组占 30%，水电占 22%，核电占 9%，其他燃料和可再生能源占 7%。显然，燃用天然气和液化天然气的机组主要是指燃气轮机和联合循环，故燃气轮机和联合循环电站在 21 世纪将成为电力工业的主力军。

在天然气管道输送和军舰等已占优势的应用领域中，燃气轮机将继续被大量使用。

此外，在燃气轮机有应用前途的一些领域中应大力开展应用发展工作，以开拓新的应用领域，例如在地面交通部门(商船和汽车等)拓展燃气轮机的应用。

2. 燃气轮机在我国的应用和发展

1) 燃气轮机在我国的应用

在我国，20 世纪 50 年代初就开始了燃气轮机的应用，当时在航空部门用涡轮喷气发动机为动力的歼击机，是从苏联引进的，地面应用燃气轮机始于 1959 年，当时从瑞士 BBC 引进了两台 6.2MW 的燃气轮机列车电站，并于次年在大庆油田投运发电，为大庆油田的建设做出了贡献。

此后，除在航空领域大量应用涡轮发动机推进飞机外，地面应用燃气轮机的领域也不断扩大，数量不断增多。改革开放以来，国民经济迅速发展，促使燃气轮机的应用迅速增多，建立了大量燃气轮机和联合循环电站，有力地缓解了因经济迅速发展而造成的电力供应紧张的局面，保障了生产的高速发展。十多年中，我国先后建立了数十座燃气轮机与联合循环电站，迄今全国总装机容量约 7200MW，比改革开放前的 20 世纪 70 年代增长 20 多倍。

在其他的领域燃气轮机也获得了较多的应用，例如油田注水、天然气处理、海上油气田、天然气管道输送、合成氨厂、钢铁厂、军舰、气垫船、高速渡船等。总之，燃气轮机在我国的应用越来越多，领域越来越广泛。

2) 我国燃气轮机工业的发展

我国燃气轮机工业是从生产航空发动机开始的。1956 年，我国的第一台国产涡轮喷气发动机在沈阳黎明发动机公司试制成功，标志着我国有了自己的燃气轮机制造工业。与此同时，也开始了地面燃气轮机的研制工作。

1962 年，上海汽轮机厂制成了第一台船用燃气轮机，功率 2.94MW(4000PS)。1964 年，南

京汽轮机厂制成了第一台发电用燃气轮机,功率 1.5MW。1969 年,哈尔滨汽轮机厂制成了第一台机车用燃气轮机,功率 2.205MW(3000PS),这是我国首台自行设计制成的燃气轮机,标志着我国具备了独立研制燃气轮机的条件和能力。在这以后,我国还先后自行研制成了 0.2MW、1MW、3MW、6MW 等发电用燃气轮机,4.41MW(6000PS)和 8.82MW(12000PS)等船用燃气轮机,以及 3.375MW(4500PS)机车用燃气轮机,此外还生产了 20MW 发电用燃气轮机。南京汽轮机厂生产的 1MW 发电用燃气轮机机组为水平中分式重型结构,由 11 级压气机、单管回流式燃烧室与 3 级涡轮机组成,为单轴机组,从压气机进气端通过减速齿轮箱驱动发电机。哈尔滨第七〇三研究所与哈尔滨汽轮机厂合作研制的舰用 4.41MW(6000 PS)燃气轮机,机组为轴向装配式轻型结构,采用滚动轴承,由 10 级压气机、直流环管型燃烧室、2 级高压涡轮机和 1 级动力涡轮机(即低压涡轮机)组成,为分轴机组,功率由动力涡轮机自排气端经联轴器输出。图 1.2 为燃气轮机等压工作的原理图。图 1.3 为舰船用复杂燃气轮机循环。

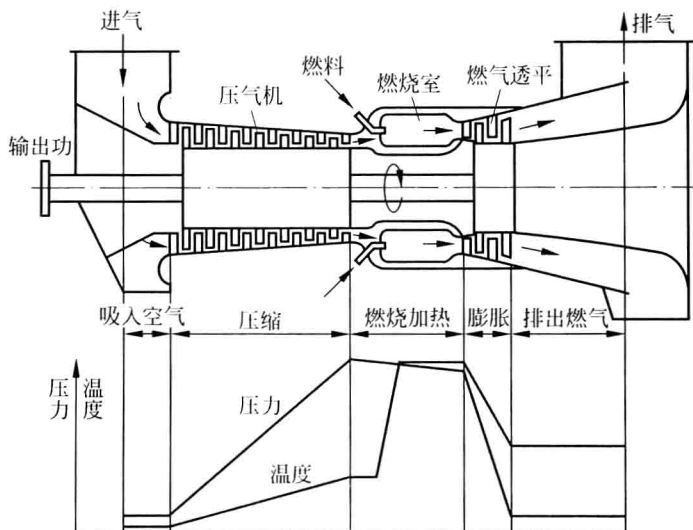


图 1.2 燃气轮机等压工作过程

从 1974 年起,我国开始了国产航空发动机改型为陆用的工作。1975 年,中国南方航空动力机械公司将单转子涡轮螺桨发动机 WJ6 改型为 WJ6G1 单轴燃气轮机,功率为 2.13MW,同年装在电站中发电,是国产燃气轮机中生产批量最多的机组。WJ6G1 燃气轮机是典型的多级燃气轮机,由 10 级压气机、直流环形燃烧室与 3 级涡轮机组成,功率经压气机进气端的减速齿轮后输出。

随后哈尔滨东安发动机制造公司、沈阳黎明航空发动机制造公司、中国西安航空发动机公司、无锡第二机械研究所和常州兰翔机械总厂等先后开展了航空发动机改型的工作,制成的机型有 WZ6G、WZ5G、WJ5G1、WP6G1、WS9G1A 和 410A 等,功率从 0.75~9.56MW。沈阳黎明航空发动机制造公司生产的 WP6G1A 燃气轮机,是将单转子的涡轮喷气发动机改为燃气发生器,在其后再加装按重型结构设计的动力涡轮机而成的。图 1.4 为 QD128 燃气机组结构,该动力装置的原型为 1984 年开始研制的涡喷 14(WP-14,涡轮喷气)航空发动机,于 1993 年试飞、2002 年设计定型(称为“昆仑”航空发动机)。该款燃气发生器为双轴循