



能源与环境出版工程

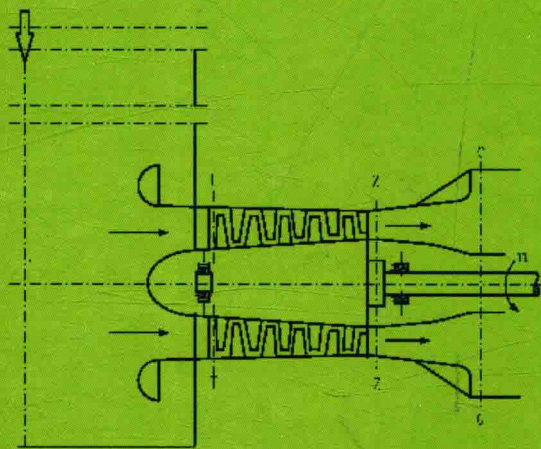
上海交通大学学术出版基金资助

总主编 翁史烈

燃气轮机设计基础

Gas Turbine Design Fundament

忻建华 钟芳源 主编



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



能源与环境出版工程

总主编 翁史烈

上海交通大学学术出版基金资助

燃气轮机设计基础

Gas Turbine Design Fundament

忻建华 钟芳源 主编



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书重点介绍了燃气轮机的设计原则、主要参数的选择、压气机、燃烧室涡轮、强度和变工况的设计,并从部件设计和总体性能方面阐述了燃气轮机设计的技术思路。另外,本书还附有各种设计、方案的详细计算表,可方便工程技术人员对不同的方案进行计算比较,以得到技术和经济俱佳的方案。

本书可作为从事燃气轮机专业研制、设计、生产、使用、管理、教学等工程技术人员和相关科研人员以及相关专业学生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

燃气轮机设计基础/忻建华,钟芳源主编. —上海:上海交通大学出版社,2015

ISBN 978-7-313-13651-0

I. ①燃… II. ①忻…②钟… III. ①燃气轮机—设计 IV. ①TK472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 193080 号

燃气轮机设计基础

主 编:忻建华 钟芳源

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:上海天地海设计印刷有限公司

开 本:789mm×1092mm 1/16

字 数:410 千字

版 次:2015 年 12 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-13651-0/TK

定 价:128.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:26

印 次:2015 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-64366274

能源与环境出版工程 丛书学术指导委员会

主 任

杜祥琬(中国工程院原副院长、中国工程院院士)

委 员(以姓氏笔画为序)

苏万华(天津大学教授、中国工程院院士)

岑可法(浙江大学教授、中国工程院院士)

郑 平(上海交通大学教授、中国科学院院士)

饶芳权(上海交通大学教授、中国工程院院士)

闻雪友(中国船舶工业集团公司 703 研究所研究员、中国工程院院士)

秦裕琨(哈尔滨工业大学教授、中国工程院院士)

倪维斗(清华大学原副校长、教授、中国工程院院士)

徐建中(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

陶文铨(西安交通大学教授、中国科学院院士)

蔡睿贤(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

能源与环境出版工程 丛书编委会

总主编

翁史烈(上海交通大学原校长、教授、中国工程院院士)

执行总主编

黄 震(上海交通大学副校长、教授)

编 委(以姓氏笔画为序)

马重芳(北京工业大学环境与能源工程学院院长、教授)

马紫峰(上海交通大学电化学与能源技术研究所教授)

王如竹(上海交通大学制冷与低温工程研究所所长、教授)

王辅臣(华东理工大学资源与环境工程学院教授)

何雅玲(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室主任、教授)

沈文忠(上海交通大学凝聚态物理研究所副所长、教授)

张希良(清华大学能源环境经济研究所所长、教授)

骆仲泐(浙江大学能源工程学系系主任、教授)

顾 璠(东南大学能源与环境学院教授)

贾金平(上海交通大学环境科学与工程学院教授)

徐明厚(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室主任、教授)

盛宏至(中国科学院力学研究所研究员)

章俊良(上海交通大学燃料电池研究所所长、教授)

程 旭(上海交通大学核科学与工程学院院长、教授)

总 序

能源是经济社会发展的基础,同时也是影响经济社会发展的主要因素。为了满足经济社会发展的需要,进入 21 世纪以来,短短十年间(2002—2012 年),全世界一次能源总消费从 96 亿吨油当量增加到 125 亿吨油当量,能源资源供需矛盾和生态环境恶化问题日益突显。

在此期间,改革开放政策的实施极大地解放了我国的社会生产力,我国国内生产总值从 10 万亿元人民币猛增到 52 万亿元人民币,一跃成为仅次于美国的世界第二大经济体,经济社会发展取得了举世瞩目的成绩!

为了支持经济社会的高速发展,我国能源生产和消费也有惊人的进步和变化,此期间全世界一次能源的消费增量 28.8 亿吨油当量竟有 57.7% 发生在中国! 经济发展面临着能源供应和环境保护的双重巨大压力。

目前,为了人类社会的可持续发展,世界能源发展已进入新一轮战略调整期,发达国家和新兴国家纷纷制定能源发展战略。战略重点在于:提高化石能源开采和利用率;大力开发可再生能源;最大限度地减少有害物质和温室气体排放,从而实现能源生产和消费的高效、低碳、清洁发展。对高速发展中的我国而言,能源问题的求解直接关系到现代化建设进程,能源已成为中国可持续发展的关键! 因此,我们更有必要以加快转变能源发展方式为主线,以增强自主创新能力为着力点,规划能源新技术的研发和应用。

在国家重视和政策激励之下,我国能源领域的新概念、新技术、新成果不断涌现;上海交通大学出版社出版的江泽民学长著作《中国能源问题研究》(2008 年)更是从战略的高度为我国指出了能源可持续发展的健康发展之路。为了“对接国家能源可持续发展战略,构建适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台”,我们策划、组织编写了这套“能源与环境出版工程”丛书,其目的在于:

一是系统总结几十年来机械动力中能源利用和环境保护的新技术新成果;

二是引进、翻译一些关于“能源与环境”研究领域前沿的书籍,为我国能源与环境领域的技术攻关提供智力参考;

三是优化能源与环境专业教材,为高水平技术人员的培养提供一套系统、全面的教科书或教学参考书,满足人才培养对教材的迫切需求;

四是构建一个适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台。

该学术丛书以能源和环境的关系为主线,重点围绕机械过程中的能源转换和利用过程以及这些过程中产生的环境污染治理问题,主要涵盖能源与动力、生物质能、燃料电池、太阳能、风能、智能电网、能源材料、大气污染与气候变化等专业方向,汇集能源与环境领域的关键性技术和成果,注重理论与实践的结合,注重经典性与前瞻性的结合。图书分为译著、专著、教材和工具书等几个模块,其内容包括能源与环境领域内专家们最先进的理论和技术成果,也包括能源与环境工程一线的理论 and 实践。如钟芳源等撰写的《燃气轮机设计》是经典性与前瞻性相统一的工程力作;黄震等撰写的《机动车可吸入颗粒物排放与城市大气污染》和王如竹等撰写的《绿色建筑能源系统》是依托国家重大科研项目的新成果新技术。

为确保这套“能源与环境”丛书具有高品质和重大的社会价值,出版社邀请了杜祥琬院士、黄震教授、王如竹教授等专家,组建了学术指导委员会和编委会,并召开了多次编撰研讨会,商谈丛书框架,精选书目,落实作者。

该学术丛书在策划之初,就受到了国际科技出版集团 Springer 和国际学术出版集团 John Wiley & Sons 的关注,与我们签订了合作出版框架协议。经过严格的同行评审,Springer 首批购买了《低铂燃料电池技术》(*Low Platinum Fuel Cell Technologies*),《生物质水热氧化法生产高附加值化工产品》(*Hydrothermal Conversion of Biomass into Chemicals*)和《燃煤烟气汞排放控制》(*Coal Fired Flue Gas Mercury Emission Controls*)三本书的英文版权,John Wiley & Sons 购买了《除湿剂超声波再生技术》(*Ultrasonic Technology for Desiccant Regeneration*)的英文版权。这些著作的成功输出体现了图书较高的学术水平和良好的品质。

希望这套书的出版能够有益于能源与环境领域里人才的培养,有益于能源与环境领域的技术创新,为我国能源与环境的科研成果提供一个展示的平台,引领国内外前沿学术交流和创新并推动平台的国际化发展!

翁史烈

2013年8月

前 言

本书可作为从事燃气轮机设计、制造的工程技术人员进行方案设计、计算的专业工具书,亦可作为高等学校燃气轮机专业和相关工程技术人员专业培训的参考书。本书的某些章节还可以作为柴油机涡轮增压器(第5、8、9章)、轴流通风机和鼓风机(第3、8、9章)设计参考用。

本书在上海交通大学钟芳源教授主编的《燃气轮机设计基础》的基础上修改完成。全书分10章。第1章为“技术要求和设计原则”。第2章为“燃气轮机的型式和主要参数的选择以及热力循环计算”。第3~6章介绍燃气轮机各主要部件——压气机、燃烧室、涡轮和进排气道的方案计算。第7章为燃气轮机的总体结构,主要介绍与绘制总体结构布置以及确定总体技术指标有关的内容。第8章为“叶片设计”,主要包括压气机和涡轮叶片的气动计算以及叶片选型等内容。第9章为“通流部分主要零件的强度与振动”,集中介绍叶片(叶身与榫头)和燃烧室的强度与振动的计算方法以及燃气轮机临界转速和不平衡响应计算。第10章为“燃气轮机变工况性能计算”。为了方便初次从事设计的人员参考和应用,本书的第2~9章均附有计算表,表中列有详细的计算公式,并给出算例,读者可以根据自己需要直接更改设计数据以得到新的设计方案。

本书的写作有3个特点:①加强燃气轮机方案设计基础,在设计内容上突出以部件性能和总体性能之间的关系,强调部件性能之间的匹配关系,确定了“以简单循环为主、以通流部分方案计算为主、以设计工况为主、在零件设计中以叶片设计为主”的原则,而对燃气轮机设计方法和经验不做全面介绍。②以方案设计为主,同时引进了有关重型燃机的结构分析和转子动力性能的计算方法。③以例题为主线,全书每章都列出计算表格和算例,可以作为手算计算的依据,并在EXCEL表中实现,计算EXCEL电子表格可从

本书附录中的网址下载,方便工程技术人员对不同的方案进行计算比较,以得到技术和经济俱佳的方案。

宋华芬、王永泓教授负责编写第2章和第10章,并编写了第2章的计算表格;常弘哲教授对原书的第4章进行了校正并由葛冰博士对其进行了修改和对新型燃烧器增加了补充内容;邵震副教授对第5章进行了校核。钟芳源教授和忻建华副教授对第3章、第6章、第7章、第8章、第9章进行了校核和修改,增加了目前的研究成果,并对全书进行了统稿,完成了全部EXCEL计算表格的编制。

在本书的编写过程中,上海交通大学学生白荣格对第3章、第6章、第8章的计算表进行了初步编制和算例计算;苏昱东对第3章计算表进行了计算校核;肖贾光毅对第8章叶片造型及第8章、第9章的校核等进行了计算和UG建模等工作;刘晓梅博士和卫明硕士对第10章的相关内容进行了绘图和论证工作;王少波、王婷、娄婧鑫、陈永照、黄威、刘伟、孟成等研究生给予了帮助。另外,上海电气电站集团、上海汽轮机制造有限公司等单位及专家也对本书的有关内容提出了许多宝贵意见或提供相关资料,作者特致深切的谢意。

我们热诚希望本书能对从事和学习燃机设计制造的广大读者有所帮助,由于作者水平有限,加之编写时间比较紧迫,书中存在的不当之处,恳请读者指正,并欢迎您对本书的意见和建议通过E-mail告诉我们,E-mail地址是:jhxin@sjtu.edu.cn。

主要符号说明

1. 通用符号

符 号	单 位	名 称	符 号	单 位	名 称
A	m^2	面积	n	r/min	转速
a	—	轴向坐标轴	p	Pa	压力
c	m/s	绝对速度	R	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	气体常数
c_p	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	定压热容	r	—	径向坐标轴
c_v	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	定体热容	T	K	热力学温度
$D(R)$	m	直径(半径)	t	$^{\circ}\text{C}$	摄氏温度
G	kg/s	质量流量	η	—	效率
g	m/s^2	重力加速度	λ	—	气流折合速度
I	J/mol	焓	ξ	—	能量损失系数
i	J/kg	比焓	σ	—	总压恢复系数
k	—	绝热指数	ω	—	总压损失系数
Ma	—	气流马赫数			

2. 热力循环与总体性能符号(第 2、10 章)

符 号	单 位	名 称	符 号	单 位	名 称
f	—	燃料空气比	η_m	—	燃气轮机机械效率
H_u	J/kg	燃料低热值	η_{rg}	—	减速器效率
N_e	kW	燃气轮机实际(有效)功率	η_{sh}	—	轴系效率
α	—	过量空气系数	π	—	膨胀(或增压)比
β	—	摩尔燃料系数	σ_b	—	燃烧室总压恢复系数
η_{B}	—	燃烧室效率	σ_{ex}	—	排气管总压恢复系数

(续表)

符 号	单 位	名 称	符 号	单 位	名 称
η_c	—	压气机效率	σ_{in}	—	进气管总压恢复系数
η_{ar}	—	考虑附件耗功的效率	σ_1	—	中间管道总压恢复系数
η_e	—	燃气轮机有效效率	τ	—	温比

3. 叶片机符号(第 3、5、8 章)

符 号	单 位	名 称	符 号	单 位	名 称
A、B、 C、D	—	沿径气流分布规律用 常数	X	—	叶端间隙影响的结构修 正系数
A、B、 C、D	—	确定抛物线用常数	$x、y$	m	中弧线坐标(沿弦长和垂 直于弦长)
a	m/s	声速	$x_0、y_0$	m	对称叶型坐标(沿中弧线 和垂直于中弧线)
b	m/s	叶片弦长	Y	—	计算沿径轴向速度变化 用的变量
c	m/s, m	绝对气流速度、叶型厚度	Z	—	级数目
c_0	m/s	按 h_0 计算的假想速度	α	(°)、—	绝对气流方向,重热系数
c_0^*	m/s	按 h_0^* 计算的假想速度	β	(°)	相对气流方向
$c_x、c_y$	—	阻力系数、升力系数	γ	(°)	叶型安装角
E	—	取决于叶栅进出口环形 面积比的参数	Δ	m	超高值
e	m	叶型出口段型线弧度的 平均曲率半径	$\Delta_1、\Delta_2$	m	内径和外径处超高,型线 一次和二次差
$e_u、e_a$	m	动叶叶顶型面重心离周 向和轴向线距离	$\Delta\beta$	(°)	气流转折角
f	m	叶型中弧线挠度	δ	(°)	偏转(落后)角
H_0	J/kg	级组中等熵焓降	ϵ	—	计算误差值
h	J/kg	有效功	ζ	—	能量损失系数
h_0	J/kg	级等熵焓降	$\eta_e、\eta_i$	—	有效效率,内效率
h_0^*	J/kg	级的理想等熵焓降	η^*	—	未计及余速损失时的内 效率
h_u	J/kg	轮周功	η_{nel}	—	多变效率

(续表)

符 号	单 位	名 称	符 号	单 位	名 称
Δh	J/kg	能量损失	η_i	—	轮周效率
i	(°)	气流攻角	η^*	—	未计及余速损失时的轮周效率
k	m	(轴向或径向)间隙	θ	(°)	叶型几何转折角
K	—	修正系数	θ_1, θ_2	(°)	进气与出气边上中弧线切线与叶弦的夹角
l	m	叶片高度	μ	—	滑差比 c_x/c_y
M	N·m	转矩	ν	m/s	运动黏性系数
m, n	—	沿径气流参数分布规律用指数	σ	—, N/m ³	总压恢复系数, 应力
N_e, N_i	kW	有效功率, 内功率	φ	—	导叶速度系数, 流量系数
o	m	叶栅通道(出口)宽度	χ	(°)	中弧线上任一点的切线与叶弦的夹角
r_1, r_2	m	叶型进口圆半径	ψ	—	动叶速度系数, 压头系数
t	m	叶栅节距	Ω	—	级反动度
u	m/s	轮周速度	ω	rad/s	角速度
w	m/s	相对气流速度	$\bar{\omega}$	—	总压损失系数

4. 燃烧室符号(第4章)

符 号	单 位	名 称	符 号	单 位	名 称
f	—	燃料空气比	δ_b	—	燃烧室总压损失系数
L_o	kg/kg	1 kg 燃料完全燃烧时所需的理论空气量	θ	(°)	扩压器扩张角
Q_{af}	J/(m ² · h · Pa)	火焰管面积热强度	η_b	—	燃烧室燃烧效率
α	—	过量空气系数	σ_b	—	燃烧室总压恢复系数
α_s	(°)	旋流器安装角	φ	—	阻力系数

5. 进排气管符号(第 6 章)

符 号	单 位	名 称	符 号	单 位	名 称
$A(\psi)$	m^2	在周角 ψ 下的蜗壳气道通流面积	L	m	进气稳压室长度
B	m^2	进气稳压室宽度	n	—	扩张度
$DC(\theta)_{\text{cr}}$	—	临界畸变角畸变指数	Q	m^3/s	容积流量
H	m^2	进气稳压室高度	Δh	J/kg	流动损失
h_{ex}	J/kg	排气管中总能量	Δp	Pa	总压损失
h_{d}	J/kg	扩压器回收能量	δ_i	—	局部地区的不均匀度
h_{v}	J/kg	蜗壳回收能量	$\bar{\delta}$	—	压气机进口流场平均不均匀度
k_{v}	—	考虑蜗壳中流场不均匀等因素的面积修正系数	ζ	—	损失系数

6. 结构与强度符号(第 7、9 章)

符 号	单 位	名 称	符 号	单 位	名 称
b	m	叶型弦长	u	m/s	圆周速度
c_{max}	m	叶型最大厚度	V	m^3	体积
E	N/m^2	材料弹性模数	W	kg	重量
F	N	作用力	α	$(^\circ)$	倾斜角
f	s^{-1}	振动频率	β	$(^\circ)$	楔形角
I	m^4	断面轴惯性矩	δ	m	厚度
J	m^4	断面极惯性矩	ε	—	应变
L	m	跨距	η		主惯性轴坐标
l	m	叶片高度	θ	—	径高比
M	$\text{N} \cdot \text{m}$	弯矩	λ	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ —	导热系数(导热率),叶片截面比
m	kg	质量	μ	—	材料泊桑系数
N		循环数	ξ		主惯性轴坐标
p	N/m^2	压强	ρ	kg/m^3	材料密度
p	rad/s	角频率	σ	MPa	零件应力
Q	N	叶片榫头拉力		h	零件寿命
q	N	轮缘凸块拉力	φ	—	截面收缩率
s	m^3	静矩	ω	s^{-1}	角速度

目 录

第 1 章 技术要求和设计原则	1
1.1 动力装置对燃气轮机设计提出的技术要求	1
1.1.1 技术指标	4
1.1.2 技术要求	4
1.2 燃气轮机设计原则和设计方法	5
1.3 燃气轮机设计内容和设计阶段	6
1.4 燃气轮机设计训练的任务和内容	8
第 2 章 燃气轮机的型式和主要参数的选择以及热力循环计算	9
2.1 燃气轮机型式的选择	9
2.1.1 简单循环、复杂循环与联合循环	9
2.1.2 单轴、分轴、双轴和多轴	12
2.1.3 功率传递方式和倒车方式	14
2.2 燃气轮机各主要部件型式的选择	16
2.2.1 压气机	16
2.2.2 涡轮	17
2.2.3 燃烧室	18
2.2.4 回热器	19
2.3 燃气轮机参数的选择	20
2.3.1 燃气最高温度 T_4^* (常称燃气初温) 的选取	21
2.3.2 总增压比 π_c^* 的选取	23
2.3.3 总压恢复系数的选择	24
2.3.4 冷却及泄漏损失选择	25
2.3.5 各部件效率的估计	27
2.4 燃气轮机热力循环计算	28
2.4.1 燃气轮机循环计算概述	28
2.4.2 循环计算主要性能指标	28

2.4.3 工质的热力性质计算	29
2.4.4 燃气热力性质计算解析式	30
2.4.5 燃气轮机热力循环计算实例	32
参考文献	40
第3章 多级轴流压气机方案计算	42
3.1 通流部分形状的选择	44
3.2 转速和圆周速度的选择	47
3.3 第一级轮毂比与末级叶高的选择	48
3.4 各级平均直径上基元级主要气动特性值的选择	49
3.5 通流部分方案计算	54
参考文献	67
第4章 燃烧室方案计算	68
4.1 燃烧室设计概述	68
4.2 燃烧室总体布置方案	69
4.2.1 小功率燃气轮机	69
4.2.2 大、中功率工业及运输式燃气轮机	70
4.2.3 流路方案选择	71
4.3 燃烧室总体尺寸的确定	73
4.3.1 确定燃烧室最大横截面积 A_{ref}	73
4.3.2 燃烧室内径 D_i 、外径 D_o 和平均中径 D_m 的确定	74
4.3.3 火焰管横截面积、火焰管直径和火焰管个数的确定	75
4.3.4 计算火焰管横截面积分割比 a_1/a_2	76
4.3.5 确定火焰管头部几何形状	77
4.3.6 确定火焰管燃烧区长度 L_c 和掺混段的长度 L_m	78
4.3.7 确定扩压器的长度 L_d	79
4.3.8 确定燃烧室长度 L_b	82
4.4 燃烧室主要零部件选型	85
4.4.1 扩压器	86
4.4.2 火焰管头部进气装置	90
4.4.3 燃气掺混装置	92
4.4.4 火焰管冷却保护装置	93
4.4.5 燃气导管	97
4.4.6 点火装置	97

4.5 火焰管进气量分配	98
4.5.1 一次空气	98
4.5.2 气膜冷却空气	99
4.5.3 掺混空气	100
4.6 低污染燃烧方案选择	100
4.6.1 燃气轮机燃烧室中 NO_x 的产生原理及抑制方法	100
4.6.2 燃气轮机燃烧室典型低 NO_x 燃烧技术	101
参考文献	106
 第5章 多级轴流涡轮方案计算	107
5.1 通流部分形状的选择	108
5.2 燃气涡轮叶片冷却方法的选择	109
5.3 圆周速度和转速的选择以及第一级与末级的直径和叶高的确定	111
5.4 第一级与末级叶片的强度估算	113
5.5 各级平均直径上基元级主要参数的选择	114
5.6 通流部分方案计算	117
参考文献	134
 第6章 进排气道主要尺寸的估计	135
6.1 进气管道主要尺寸的估计	136
6.1.1 进气道的组成、要求和技术指标	136
6.1.2 进口流道截面积以及导流罩与进口锥的计算	138
6.1.3 进口防护网罩	139
6.1.4 进气稳压室主要尺寸及进气口位置	139
6.2 排气管道主要尺寸的估计	142
6.2.1 排气管的功用和基本型式	142
6.2.2 排气管气动性能指标	142
6.2.3 排气管扩张比 n 的选择以及扩压器与蜗壳的扩张比 n_d 和 n_v 的分配	144
6.2.4 环形增压器的型式和主要尺寸的选择以及成型方法	146
6.2.5 蜗壳主要尺寸的确定	156
参考文献	159
 第7章 燃气轮机的总体结构、重量估算以及通流部分的零件材料	160
7.1 燃气轮机的总体结构	160