



国家科学技术学术著作出版基金
资助出版



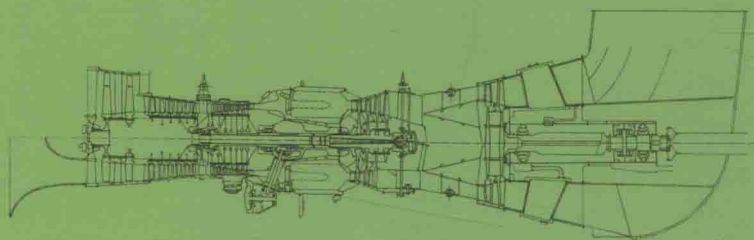
能源与环境出版工程

总主编 翁史烈

现代燃气轮机装置

Advanced Gas Turbine Engines

翁史烈 王永泓 宋华芬 张会生 著



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

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

现代燃气轮机装置

Advanced Gas Turbine Engines

翁史烈 王永泓 宋华芬 张会生 著



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

内容提要

本书重申了燃气轮机总体性能的基本概念、基本知识和基本理论,并根据燃气轮机研究、开发、设计、制造的需要,在计算机仿真、故障诊断等方面展开论述。全书共分6章。第1章介绍燃气轮机性能分析的基础理论;第2章阐述了燃气轮机的稳态工况和动态过程数学模型;第3章在微分流型上建立以哈密顿方程表达的燃气轮机总体性能模型,并构建了能在离散化计算过程中始终保持原方程基本特性的辛几何算法;第4章结合我国燃气轮机研制实际,提出燃气轮机及自动控制系统的仿真实验;第5章阐述了性能分析理论在燃气轮机改进设计中的应用;第6章系统地介绍故障模型的构建及故障诊断平台硬件与软件的组合。

本书涵盖了燃气轮机总体性能的主要内容,提出的部分理论、模型及解法具有一定的创新性、先进性和实用性,希望能为推进我国的燃气轮机自主创新进程发挥作用。

本书可供燃气轮机及相关领域的高校师生、研究人员及工程技术人员在工作和学习中参考。既可用于指导相关人员进行燃气轮机总体性能设计研究,也可用于燃气轮机专业人员教学和培训。

图书在版编目(CIP)数据

现代燃气轮机装置/翁史烈等著. —上海:上海交通大学出版社,2015

ISBN 978-7-313-13037-2

I. ①现… II. ①翁… III. ①燃气轮机—装置 IV. ①TK47

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第111412号

现代燃气轮机装置

著 者: 翁史烈 王永泓 宋华芬 张会生

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: 山东鸿君杰文化发展有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

字 数: 390千字

版 次: 2015年12月第1版

书 号: ISBN 978-7-313-13037-2/TK

定 价: 88.00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: 19.5 插页 8

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: 0533-8510898

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,我国国民生产总值从 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方法和技术成果,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

燃气轮机由压气机、燃烧室、涡轮、热交换器等部件组成。其运行性能不仅取决于诸部件性能的优劣,而且还取决于各部件性能能否相互匹配。燃气轮机总体性能分析的核心任务就是在流量平衡、功率平衡、转速平衡、压比平衡下,简言之,在平衡运行的条件下,预测机组的全工况性能,包括经济性、稳定性、机动性和做功能力。

20 世纪 80 年代,上海交通大学出版社出版了《燃气轮机性能分析》。该书在牛顿力学的框架内,构建了动态、稳态性能分析所必需的数学模型,并提供了数学模型的有效解法。模型成功地应用到燃气轮机总体性能预测中去,在当时的科研、教育、生产中发挥了很好的作用。

跨入新世纪之后,中国燃气轮机产业从风雨飘摇的波动中奋起。为了满足燃气轮机产业自主创新的需要,燃气轮机总体性能的理论 and 实践也亟待推陈出新。我们汇集多年研究开发的资料,推出了燃气轮机总体性能的新篇。谨就新著内容作简要说明。

(1) 新书重申了燃气轮机总体性能的基本概念、基本知识和基本理论,因为它们是不能违背的,是进一步创新的基础。然后根据燃气轮机研究、开发、设计、制造的需要,在计算机仿真、故障诊断等方面编写了一系列的新篇章。

(2) 众所周知,燃气轮机及其部件的优异性能离不开试验研究。正因如此,总体性能的计算机仿真技术就成为一种必不可少的方法来指引试验方向,减少试验的时间和资金投入。不仅如此,总体性能仿真还是研究和制订燃气轮机控制策略的必由之路。鉴于仿真技术的重要性,本书第 4 章结合我国燃气轮机研制实际,提出燃气轮机及自动控制系统的仿真实论,包括建模和算法。

(3) 一台性能优异的燃气轮机往往可以派生出许多不同用途、不同容量的新机型。多少年来,许多大公司的实践证明这是一条非常有效的技术

路线。于是,燃气轮机的“改型设计”就应运而生。改型设计不同于重新设计。本书第5章将结合本研究所研发成果阐述其特点和方法。

(4) 在发动机的性能指标中,运行安全可靠是最关键的。把先进的信息技术、测试技术和燃气轮机总体理论结合,构建性能监控和故障诊断系统,也有人称之为燃气轮机“健康管理系统”,这是现代燃气轮机所不可缺少的系统。惜乎国内重视不够、资料稀缺。本书第6章将系统地介绍故障模型的构建和故障诊断平台硬件和软件的组合。

(5) 任何数学模型在计算机中都只能进行离散化的数值计算,而判断数值计算可靠性的一条基本法则就是:数值计算中必须保持数学方程的原有特性,否则可能导致误差不断积累而严重失真。在燃气轮机领域中,表征燃气轮机的总体性能的微分方程组是在欧氏空间中的牛顿方程,其离散化求解一直沿用改进欧拉法或龙格-库塔法。几十年来燃气轮机同行中尚未有人对这一套模型及其解法提出过质疑,但是从数学的基本法则来判断,这一套方法难以经得起推敲,因为牛顿方程的基本特性是什么无人能回答,龙格-库塔法能否保持原特性更是无从谈起!实际上,在动力学的大领域中,这类问题的严重性已引起普遍重视并有新的对策。燃气轮机总体性能预测的数学框架“依然故我”的状态,仅仅是由于这个波动尚未延伸到燃气轮机动力学的范围而已。本书在第3章中,将在微分流形上建立以哈密顿方程(代替牛顿方程)表达的燃气轮机总体性能,揭示哈密顿方程的基本特性,并构建能在离散化计算进程中始终保持原方程基本特性的辛几何算法。这是在燃气轮机建模和求解中跨出了非常关键的一步。

综上所述,本书涵盖了燃气轮机总体性能的主要内容。希望书中的新观点和新方法能得到同行专家的指正,更希望能在我国燃气轮机自主创新进程中发挥应有的作用。

最后,还要指出是本书的出版还和博士研究生刘晓梅、夏迪、邱超和硕士研究生卫明、马怀腾、马晨皓等的大量研究工作紧密相关,特别要提出的是刘晓梅和卫明同学还协助完成了大量技术性工作,在此一并致以谢意。

翁史烈

2014.07.15

符号说明

a	音速, m/s; 冷却因子
A	面积, m^2
b	叶型弦长, m
B	燃烧室燃油消耗量, kg/h
c	绝对速度, m/s; 比热, $\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})$
$C_{\max}$	叶型最大厚度, m
C_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
C_v	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
D	直径, m
$q(\lambda)$	气动函数
f	燃料空气比或油气比
h	比焓, J/kg
H	焓, J; 叶高, m
i	攻角
Ma	马赫数
n	转速, r/min ; 多变指数
N	级数; 叶片数
o	喉部宽度, m
p	压强, Pa
P_e	功率, kW
q_m	质量流量, kg/s
R	气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; 误差传播因子; 半径, m
S	熵, kJ/K
t	叶栅节距, m
sfc	单位燃油消耗率, $\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$
T	温度, K
T_s	排气温度设定值, $^{\circ}\text{C}$

u	周向速度, m/s
V	体积, m^3 ; 位能(势能), J
w	相对速度, m/s
W	功, J, kJ
α	叶片绝对气流角; 换热系数; 过量空气系数
β	叶片相对气流角; IGV 角度
γ	绝热指数
δ	相对误差: $\delta X = dX/X$, $\delta\lambda = d\lambda/\lambda$; 冷却空气系数
ϵ	允许误差; 总压恢复系数
η	效率
θ	动叶出口截面, 表示 ψ ; 静叶出口截面, 表示 φ
λ	速度系数
μ	黏度, Pa/s; 回热度
π	压比
ρ	密度, kg/m^3 ; 反动度
σ	总压恢复系数
$\bar{\omega}$	总压损失系数
τ	温比
φ, ψ	静叶和动叶的速度系数
M	微分流形
(U, φ_U)	流形上的坐标卡
C^r	直到 r 阶连续可微的映射
$\mathbf{X}_z$	微分流形上在 z 点处的切向量
$T_z(M)$	微分流形上在 z 点处的切空间
$\left\{ \frac{\partial}{\partial z^i}, i=1, 2, \dots, n \right\}$	微分流形上切空间的基底
$\wedge$	外积
J	Jacobi 矩阵
ξ, η	微分流形上的切向量
$\omega^2(\omega)$	辛结构
S	辛矩阵
M_g	正则变换
φ	转动轴的转角, rad
$\dot{\varphi}_z$	转动轴的角速度, rad/s
ρ	转动轴内各点离轴线的距离

J_z	转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$
ΔQ	功率差, $\text{N} \cdot \text{m}$
λ	角动量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$
ΔM	扭矩差, $\text{N} \cdot \text{m}$

上标

i	涡轮的第 i 级
*	滞止状态
'	几何角

下标

0	静叶进口状态
1	静叶出口状态
2	动叶出口状态
av	平均参数
BUM	“自下而上”法参数
C	压气机参数;冷流体通道参数
cal	程序计算参数
c, w	流过基元级的绝对参数;流过基元级的相对参数;换热壁
cr	临界参数
cs	每个叶栅截面的参数,对于一级涡轮(压气机) λ_{cs}^i 表示 λ_{c0}^i 、 λ_{c1}^i 、 λ_{w1}^i 、 λ_{w2}^i 和 λ_{c2}^i , $\lambda_{c0}^i = \lambda_{c2}^{i-1}$
T	涡轮
B	燃烧室
gt	燃气轮机
h	热通道参数
H	高压参数
L	低压参数
M	中压参数
max	最大
min	最小
TDM	“自上而下”法参数
s	标准海平面条件下参数
st	蒸汽

缩 写

IGV	压气机进口可转导叶
HLG	起动升速控制器
NPR	转速/负荷控制器
OTC	排气温度控制器
PGR	功率限制控制器
VPVR	压比限制控制器
LTR	IGV 温度控制器
LSRH	压气机 IGV 位置控制器
RSP	值班气阀门升程控制器
RSGV	天然气预混系统阀门升程控制器
PEL	电功率测量值
ATK	透平出口温度修正值
TVIW	压气机进口温度
STON	蒸汽轮机切入指令
LAW	甩负荷指令
VPVR	压气机压比限制控制器
KLGR	冷却空气控制器

目 录

第 1 章 燃气轮机性能分析的基础理论	001
1.1 燃气轮机的稳态工况和动态过程概述	001
1.2 燃气轮机负荷特性和组合形式	003
1.2.1 负荷特性	003
1.2.2 燃气轮机组合形式	004
1.3 燃气轮机变工况分析时需用的一些概念	005
1.3.1 稳态和动态分析时需用的基本数据和关系式	005
1.3.2 压气机特性图上的等温线	006
1.3.3 变工况时涡轮各级间的膨胀比再分配问题	008
1.4 燃气轮机各主要部件的变工况特性	009
1.4.1 压气机的变工况特性分析	009
1.4.2 涡轮的变工况特性分析	012
1.4.3 燃烧室的变工况特性分析	016
1.4.4 回热器、中间冷却器和管道阻力等的变工况特性分析	021
1.5 单轴燃气轮机的变工况性能	024
1.6 分轴燃气轮机的变工况性能	028
1.7 多轴燃气轮机的变工况性能	033
1.8 燃气轮机的外特性	040
1.9 大气参数变化对燃气轮机性能的影响	044
1.9.1 概述	044
1.9.2 燃气轮机工况相似的决定性准则	045
1.9.3 实验或计算数据的整理	047
1.9.4 工况相似的近似性	050
1.9.5 不同大气条件下的平衡工作线	051
1.10 可转导叶压气机在燃气轮机中的应用	052
1.11 变几何涡轮在燃气轮机中的应用	056

第2章 燃气轮机稳态工况和动态过程数学模型	059
2.1 牛顿力学体系下燃气轮机的稳、动态数学模型	059
2.1.1 数学模型	059
2.1.2 稳态数学模型的解法	063
2.1.3 燃气轮机动态过程的解法	068
2.1.4 考虑容积惯性和热惯性的动态过程数学模型	073
2.2 哈密顿力学体系下燃气轮机动态过程数学模型	076
2.2.1 定轴转动下燃气轮机的转子运动基本方程	077
2.2.2 燃气轮机系统的热力学势能	079
2.2.3 哈密顿形式数学模型的建立	084
2.2.4 燃气轮机系统中能量守恒规律	087
2.2.5 燃气轮机动力系统中扭矩差 ΔM 的计算	088
第3章 燃气轮机动态过程的辛几何算法	091
3.1 流形和微分流形	091
3.2 微分流形上的切向量	092
3.3 流形上的微分形式	093
3.4 微分流形上的辛结构	094
3.5 保辛——辛矩阵和正则变换	096
3.6 哈密顿系统及其特性	097
3.7 燃气轮机动态过程的数值求解	100
3.7.1 组合法	102
3.7.2 五步三阶 FSJS 格式的代数阶条件	102
3.7.3 相位阶条件	104
3.7.4 五步三阶 FSJS 格式的通式	106
3.8 对新计算格式的考核	108
3.8.1 模型1	108
3.8.2 模型2	111
第4章 燃气轮机仿真技术	117
4.1 燃气轮机建模与仿真技术的发展	117
4.1.1 燃气轮机建模技术的发展	117
4.1.2 燃气轮机仿真模型的发展	118
4.2 基于容积法思想的燃气轮机模块库的建立	119
4.2.1 模块的概念	119

4.2.2 燃气轮机系统模块库的建立	120
4.2.3 模块之间连接关系的处理规则	125
4.2.4 燃气轮机非迭代动态模型的建立	127
4.3 燃气轮机动态性能仿真研究	128
4.3.1 起动过程的仿真研究	130
4.3.2 升/降负荷仿真	135
4.3.3 甩负荷过程仿真	136
4.4 燃气轮机控制性能仿真研究	137
4.4.1 燃气轮机控制系统概述	137
4.4.2 功率限制控制系统	138
4.4.3 转速/负荷控制系统	141
4.4.4 排气温度控制系统	142
4.4.5 IGV 温度控制系统	145
4.4.6 燃气轮机控制性能的仿真分析	148
4.5 三轴燃气轮机动态过程的辛算法求解	153
第5章 性能分析理论在燃气轮机改型设计中的应用	158
5.1 燃气轮机改型设计概述	158
5.1.1 燃气轮机的改型设计	159
5.1.2 燃气轮机反命题计算的理论基础	160
5.2 燃气轮机改型设计中轴流压气机性能的建立	160
5.2.1 相似理论在燃气轮机改型设计中的应用	160
5.2.2 压气机模化设计	162
5.2.3 压气机的加级和减级	163
5.2.4 改型压气机性能预估实例	166
5.3 燃气轮机改型设计中轴流涡轮性能的建立	168
5.3.1 燃气轴流涡轮改型概述	168
5.3.2 变几何涡轮通流部分基本方程	171
5.3.3 变几何涡轮损失模型	181
5.3.4 变几何涡轮性能参数计算	189
5.3.5 变几何燃气涡轮性能预估软件设计	191
5.4 改型燃气轮机设计计算理论及应用	197
5.4.1 多变量燃气轮机	197
5.4.2 改型燃气轮机稳态性能的优化——混合解法	199
5.4.3 当量通流部分计算理论及应用	206