

国外油气勘探开发新进展丛书

GUOWAIYOUQIKANTANKAIFAXINJINZHANCONGSHU



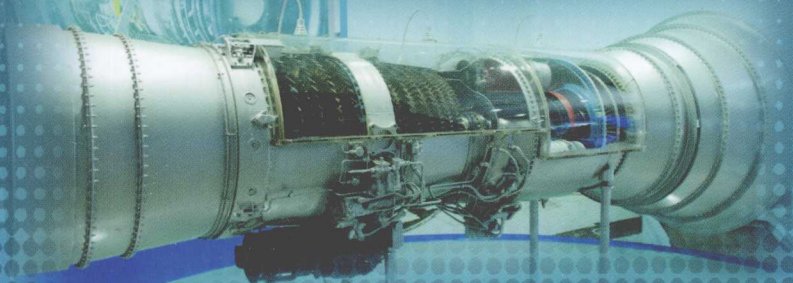
# 燃气轮机工程手册 (第三版)

# GAS TURBINE ENGINEERING HANDBOOK (Third Edition)

[美] 梅赫湾·P. 博伊斯 编

马丽敏 张永学 郭煜 陈鸿海 译

姬忠礼 赵洪滨 校



石油工业出版社

国外油气勘探开发新进展丛书 (九)

# 燃气轮机工程手册

(第三版)

[美] Meherwan P. Boyce 编

马丽敏 张永学 郭煜 陈鸿海 译  
姬忠礼 赵洪滨 校

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本手册详细介绍了燃气轮机的设计理论、结构组成、工作原理、安装、操作和维修等内容。最后一章对燃气轮机失效的历史案例进行了剖析。

本书适合于石化、发电等行业与燃气轮机应用相关的工程技术人员阅读，也适合于燃气轮机设计、制造人员使用以及院校相关专业师生参考。

### 图书在版编目 ( CIP ) 数据

燃气轮机工程手册 / [美] 博伊斯编 ; 马丽敏等译 .

北京 : 石油工业出版社 , 2012.7

( 国外油气勘探开发新进展丛书 ; 9 )

书名原文 : Gas Turbine Engineering Handbook

ISBN 978-7-5021-9013-2

I . 燃… II . ①博…②马… III . 燃气轮机 - 技术手册 IV . TK47-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 ( 2012 ) 第 067912 号

Gas Turbine Engineering Handbook, Third Edition, Meherwan P. Boyce, ISBN:978-0-7506-7846-9 Copyright © 2006 by Elsevier. All rights reserved. Authorized simplified Chinese translation edition published by the proprietor. Copyright © 2012 by Elsevier (singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Published in China by Petroleum Industry Press Ltd. under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予石油工业出版社在中国大陆地区 ( 不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区 ) 出版与发行。未经许可之出口, 视为违反著作权法, 将受法律制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签, 无标签者不得销售。

著作权合同登记号图字 : 01-2008-1471

---

出版发行 : 石油工业出版社

( 北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011 )

网 址 : [www.petropub.com.cn](http://www.petropub.com.cn)

编辑部 : ( 010 ) 64523583 发行部 : ( 010 ) 64523620

经 销 : 全国新华书店

印 刷 : 北京中石油彩色印刷有限责任公司

---

2012 年 7 月第 1 版 2012 年 7 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本 : 1/16 印张 : 37.5

字数 : 960 千字

---

定价 : 160.00 元

( 如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换 )

版权所有, 翻印必究

# 《国外油气勘探开发新进展丛书（九）》

## 编 委 会

主 任：赵政璋

副 主 任：赵文智 张卫国

编 委：（按姓氏笔画排序）

马 纪 侯玉芳 詹盛云 刘德来

张 磊 杨 虎 张仲宏 周家尧

姬忠礼 周思柱 章卫兵

## 序

为了及时学习国外油气勘探开发新理论、新技术和新工艺，推动中国石油上游业务技术进步，本着先进、实用、有效的原则，中国石油勘探与生产分公司和石油工业出版社组织多方力量，对国外著名出版社和知名学者最新出版的、代表最先进理论和技术水平的著作进行了引进，并翻译和出版。

从2001年起，在跟踪国外油气勘探、开发最新理论新技术发展和最新出版动态基础上，从生产需求出发，通过优中选优已经翻译出版了8辑近50本专著。在这套系列丛书中，有些代表了某一专业的最先进理论和技术水平，有些非常具有实用性，也是生产中所亟需。这些译著发行后，得到了企业和科研院校广大生产管理、科技人员的欢迎，并在实用中发挥了重要作用，达到了促进生产、更新知识、提高业务水平的目的。部分石油单位统一购买并配发到了相关的技术人员手中。同时中国石油总部也筛选了部分适合基层员工学习参考的图书，列入“千万图书送基层，百万员工品书香”活动的书目，配发到中国石油所属的4万个基层队站。该套系列丛书也获得了我国出版界的认可，三次获得了中国出版工作者协会的“引进版科技类优秀图书奖”，形成了规模品牌，产生了很好的社会效益。

2011年在前8辑出版的基础上，经过多次调研、筛选，又推选出了国外最新出版的6本专著，即《油藏工程手册》、《现代油藏工程》、《钻井工程手册》、《空气与气体钻井手册（第三版）》、《燃气轮机工程手册》、《阀门选用手册（第五版）》，以飨读者。

在本套丛书的引进、翻译和出版过程中，中国石油勘探与生产分公司和石油工业出版社组织了一批著名专家、教授和有丰富实践经验的工程技术人员担任翻译和审校人员，使得该套丛书能以较高的质量和效率翻译出版，并和广大读者见面。

希望该套丛书在相关企业、科研单位、院校的生产和科研中发挥应有的作用。

中国石油天然气股份有限公司副总裁



## 第三版前言

《燃气轮机工程手册》一书从燃气轮机的设计、制造、安装、操作以及维修几方面进行了论述。第三版不仅对 2000 年以来燃气轮机技术方面已经取得的巨大进步进行了更新，并且对很多章节进行了重新编写，解答了当前燃气轮机在设计、制造、安装、操作以及维修中所面临的问题。第三版增加了一章新的内容，对燃气轮机操作性能恶化及其所有主要部件失效的历史案例进行了剖析。对维护技术这一章的内容全部重新进行了编写和更新。修正后的章节涉及到“长期服务协议” Long Term Service Agreements (LTSAs)，并添加了特殊维护表，使读者在遇到这些问题时能找到相应排除故障的方法。

新一代燃气轮机的点火温度已达到  $2600\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $1427\text{ }^{\circ}\text{C}$ )，航改型燃气轮机的压比已超过  $40:1$ ，工业型燃气轮机的压比也超过了  $30:1$ 。针对以上情况，对第七章进行了重新编写，使读者能够完全了解轴流式压气机在这样高压比工况下的操作工艺。这一章详细阐述了压气机中喘振现象的产生，非常详尽地描述了在燃气轮机的压气机中产生喘振、旋转失速以及节流的不同机理。材料以及涂层方面的进步促进了燃气轮机技术的发展，在第三版中对此做了详细的论述。对燃气轮机低  $\text{NO}_x$  排放问题的重视，导致了干式低  $\text{NO}_x$  燃烧器这种新型燃烧器的发展，第三版对与此相关的问题进行了深入的介绍。第三版还介绍了先进燃气轮机的设计和维护方面的内容以及燃气轮机所涉及的大部分性能规范和机械标准。

第三版手册是与工作在电厂、石化以及海洋平台上经验丰富的工程师一起编写的。第三版将帮助读者更清楚地认识他所遇到的问题，并知道如何避免问题产生。

本书还为那些初次进入接触燃气轮机机械领域的研究生和本科生介绍了流体力学和热力学方面的基础知识。本书可作为本科生或研究生学习燃气轮机机械课程很好的教材，也可作为石化、发电、海上工业等相关行业的公司进行内部培训的教材。

在过去的这几年中，燃气轮机机械在石化、发电以及海上工业中得到广泛应用。在过去的十年中，电力行业已开始采用联合循环电厂，新一代高效燃气轮机在这段电力行业的发展阶段中处于中心地位。然而，由于天然气价格的不断上涨，许多有基本设计负荷的电厂每天在 50% 负荷和满负荷间循环工作，很多时候不得不在周末停机。在修改后关于维修的章节中包含相关案例，这对工程师处理不在设计工况下的情况提供很大帮助。这一版中还对这些电厂采用其他燃料时的操作状况进行了分析。

本手册可以帮助制造厂家了解燃气轮机在现场使用中曾经出现的问题，也可以帮助用户提高使用效率。

从 20 世纪 60 年代早期以来，我先后从事过燃气轮机研究、设计、操作以及维护方面的工作。我也曾在奥克拉荷马大学与得克萨斯 A&M 大学为研究生及本科生讲授过这门课程，现在，一般对在职人员讲课。迄今为止，有来自世界各地 450 多家公司超过 4000 人，参加过我针对现场工程人员而设计的课程。他们使用本书后的评价以及我的现场故障排除经验，对这次版本中材料的升级产生了很大影响。学生们对课程的热情为我完成本书的修订提供了极大的鼓励。在过去 35 年中许多我讲授过的课程已成为我以及学生们的教育经

历。我在担任电力、石化以及航空工业顾问期间，与高级专业人士之间的讨论与咨询，对我个人生活、职业生涯和新书的修订有很大帮助。

在第三版中，我尝试将不同论文中的题材（有时是不同的观点）加以吸收，并做统一的细致处理。书中采用了大量的插图、曲线以及表格，使书中的文字描述更加便于读者理解。新表格的增添可用于问题诊断。此外，参考文献标明了资料的来源从而可以帮助读者查明并解决具体问题。我希望本书在完成它的首要任务——将读者引入燃气轮机这一广阔领域之后，能成为一本参考书。

感谢从事燃气轮机工作的工程师们，他们已出版的论著及与他们的讨论构成了本书的基础。我为创建了叶轮机械研讨会并主持了 8 年而感到荣幸，在研讨会的进程中，无论从设计还是维修角度提出了很多令人关注的技术问题。特别要感谢得克萨斯 A&M 大学叶轮机械顾问委员会中我的同事们，我与他们共事 34 年，还要感谢顾问委员会的现任主席 Dara Childs 博士。

我要特别感谢我的妻子 Zarine，感谢她在整个工作中的帮助和鼓励。还要特别感谢我的秘书和行政助理 Donna Masters，感谢她为再版手册和我一起工作的日子。

我诚挚地希望本手册能给读者提供燃气轮机技术更新的知识，并提高燃气轮机的维护实践水平的同时，保留推动燃气轮机发展的基本理论。

Meherwan P. Boyce

## 第二版前言

《燃气轮机工程手册》一书从燃气轮机的设计、制造、安装、操作以及维修几方面进行了论述。第二版不仅对 20 世纪 90 年代以来燃气轮机技术方面已经取得的巨大进步进行了更新，并且对很多章节进行了重新编写，使其能够更好地回答当前燃气轮机设计、制造、安装、操作以及维修中所面临的问题。新一代燃气轮机的点火温度已达到  $2600^{\circ}\text{F}$  ( $1427^{\circ}\text{C}$ )，航改型燃气轮机的压比已超过  $40:1$ ，工业型燃气轮机的压比也超过了  $30:1$ 。材料以及涂层技术的进步促进了高点火温度技术的发展，在第二版中对这一新的内容做了详细的论述。对燃气轮机低  $\text{NO}_x$  排放问题的重视，促进了干式低  $\text{NO}_x$  燃烧器这种新型燃烧器的发展，第二版对与此相关的问题进行了深入的介绍。第二版还对燃气轮机所涉及的大部分性能规范以及机械标准进行了更新。

本书的重新编写使得在燃气轮机这一专业领域工作的有经验的工程师、年轻的工程专业研究生或是第一次接触燃气轮机的本科生，都可以通过阅读本手册从而获得对燃气轮机整体全面的了解。本书可作为本科生或研究生学习燃气轮机机械课程很好的教材，也可作为石化、发电、海上工业等相关行业的公司进行内部培训的教材。

在过去的这几年中，燃气轮机机械在石化、发电以及海洋工业中得到广泛应用。在过去的 10 年中，电力行业已开始采用联合循环电厂，新一代高效燃气轮机在这时期电力行业的发展阶段中处于核心地位。针对这些变化，我对第一、第二章进行了重新编写。本书面对的读者是燃气轮机的用户及制造商，可以帮助制造厂家了解燃气轮机在现场使用中曾经出现的问题，也可以帮助用户提高使用效率。

从 20 世纪 60 年代早期以来，我先后从事过燃气轮机研究、设计、操作以及维护方面的工作。我也曾在奥克拉荷马大学与得克萨斯 A&M 大学为研究生及本科生讲授过这门课程，现在，一般对在职人员讲课。迄今为止，有来自世界各地 400 多家公司超过 3000 人，学习过我针对现场工程人员而设计的课程。他们使用本书后的评价，对这次版本中材料的升级产生了很大影响。学生们对课程的热情为我完成本书的修订提供了极大的鼓励。在过去 25 年中许多我讲授过的课程已成为我以及学生们的教育经历。得克萨斯 A&M 大学叶轮机械研讨会，是我组织成立的，并担任了 8 年多的主席，同时担任顾问委员会的成员长达 30 年，该研讨会为书中操作以及维护的章节的修改做了很大的贡献。我与高级专业人士之间的讨论与咨询，对我个人生活、职业生涯和新书的再版都提供了很大帮助。

在本书中，我尝试将不同论文中的题材（有时是不同的观点）加以吸收，并做统一的细致处理。书中采用了大量的插图、曲线以及表格更便于读者对内容的理解。我特意将书中的数学推导控制在最少的程度，使得读者在做细节设计之前就能够发现并解决所遇到的任何问题。此外，参考文献标明了资料的来源从而可以帮助读者查明并解决具体问题。我希望本书在完成它的首要任务——将读者引入燃气轮机这一广阔领域之后，能成为一本参考书。

感谢从事燃气轮机工作的工程师们，他们已出版的论著及与他们的讨论构成了本书的



基础。尤其要感谢我所有的研究生以及从前在得克萨斯 A&M 大学的同事们，没有他们的鼓励与帮助，本书不可能完成。特别要感谢得克萨斯 A&M 大学燃气轮机机械研讨会的顾问委员会以及 Dr. M. Simmang，得克萨斯 A&M 大学机械工程系的主任，他们对我最初编写原稿给予了很大帮助。

我要特别感谢我的妻子 Zarine，感谢她在整个工作中的持续不断的帮助和鼓励。

我诚挚地希望读者在阅读第二版手册时能像我编写它时一样有兴趣，希望本书能成为飞速发展的燃气轮机机械领域中有用的参考书。

最后，我要为我的导师、也是我的朋友 C.M. Simmang 博士而哀悼，他为本书的第一版写了序，他的离去不仅是我，也是机械工程教育界，还有他教过的得克萨斯 A&M 大学的学生们的巨大损失。

Meherwan P. Boyce

# 第一版前言

《燃气轮机工程手册》一书从燃气轮机的设计、制造、安装、操作以及维修几方面进行了论述。本书的编写使得在燃气轮机某一专业领域工作的有经验的工程师、年轻的工程专业研究生或是第一次接触燃气轮机的本科生，都可以通过阅读本手册从而获得对燃气轮机整体全面的了解。本书可作为本科生或研究生学习燃气轮机机械课程很好的教材，也可作为石化、发电、海洋工业等相关行业的公司进行内部培训的教材。

在过去的这几年中，燃气轮机机械在石化、发电以及海洋工业中得到广泛应用。本书面对的读者是燃气轮机的用户及制造商，可以帮助制造商了解燃气轮机在现场使用中曾经出现的问题，也可以帮助用户提高使用效率。

从 20 世纪 60 年代早期以来，我先后从事过燃气轮机研究、设计、操作以及维护方面的工作。也曾在奥克拉荷马大学与得克萨斯 A&M 大学为研究生及本科生讲授过这门课程，现在，一般对在职人员讲课。学生们对课程的热情为我完成本书提供了极大的鼓励。在过去 15 年中许多我讲授过的课程已成为我以及学生的教育经历。得克萨斯 A&M 大学叶轮机械研讨会，是我组织成立的，并担任了 7 年多的主席，该研讨会为书中操作以及维护的章节做了很大的贡献。我与高级专业人士之间的讨论与咨询，对我个人生活、职业生涯和本书的编写都提供了很大帮助。

在本书中，我尝试将不同论文中的题材（有时是不同的观点）加以吸收，并做统一的细致处理。书中采用了大量的插图、曲线以及表格更便于读者对内容的理解。有意地将书中的数学推导控制在最少的程度使得读者在做细节设计之前就能够发现并解决所遇到的任何问题。此外，参考文献标明了资料的来源从而可以帮助读者查明并解决具体问题。我希望本书在完成它的首要任务——将读者引入燃气轮机这一广阔领域之后，能成为一本参考书。

感谢从事燃气轮机工作的工程师们，他们已出版的论著及与他们的讨论构成了本书的基础。尤其要感谢我所有的研究生以及从前在得克萨斯 A&M 大学的同事们，没有他们的鼓励与帮助，本书不可能完成。特别要感谢得克萨斯 A&M 大学燃气轮机机械研讨会的顾问委员会以及得克萨斯 A&M 大学机械工程系的主任 Dr. M. Simmang，他们对我最初编写原稿给予了很大帮助。感谢 Janet Broussard 完成了初期手稿的打字工作。感谢 Gulf 出版社 William Lowe 和 Scott Becken 的指导，在他们的耐心帮助下，才使本书从手稿成为最终的成书。最后，我要特别感谢我的妻子 Zarine，感谢她在整个工作中不懈的帮助和鼓励。

我诚挚地希望读者在阅读本手册时能像我编写它时一样有兴趣，希望本书能成为飞速发展的燃气轮机机械领域中有用的参考书。

Meherwan P. Boyce

# 第一版序

亚历山大的科学家 Hero (约公元前 120 年) 或许不会想到今天现代的燃气轮机源自于他的汽转球, 只是他发明的汽转球不产生轴功, 仅仅是旋转。在接下来的几个世纪里, 汽转球的原理被用于风车 (公元 900—1000 年), 后来又用于转动烤肉叉 (17 世纪)。第一台成功的燃气轮机的出现迄今大概不超过 1 个世纪。

直到最近, 燃气轮机的设计者在设计高效率燃气轮机时面临的两个首要障碍是: (1) 燃气轮机喷嘴入口的气体必须具有较高的温度; (2) 压气机和燃气轮机必须在高效率下工作。冶金技术的发展使得燃气轮机入口温度不断提高, 同时随着人们对空气动力学更加深入的理解, 也在一定程度上提高了离心式和轴流式压气机、径流向心式以及轴流式燃气轮机的效率。

当前燃气轮机的设计工程师及操作工程师关于燃气轮机还有许多其他方面的担心与考虑。这些担忧主要包括轴承、密封、燃料、平衡、联轴器、测试以及维护等。《燃气轮机工程手册》提供了必要的数据和有帮助的建议, 可以帮助工程师用尽一切方法使得任何燃气轮机在任何的条件下都能获得最佳的性能。

Meherwan Boyce 在燃气轮机方面经验很丰富。十多年来他在燃气轮机机械的工业技术、学术研究以及出版物方面一直非常活跃。创建每年一度的得克萨斯 A&M 大学燃气轮机机械研讨会可作为他在燃气轮机机械领域做出的主要贡献之一。Boyce 博士在成立自己的咨询与工程公司之前先后指导了 7 个类似的公司。第十届研讨会已于近日召开并吸引了来自不同国家的 1200 多名工程师前来参会。

这本由资深工程师编写的重要手册, 在能源价格既没有变得更贵也没有达到其最高上限这一恰当的时期完成。Boyce 博士在手册中提供了优化使用燃气轮机所需能源的方法。即使那些不是专门从事燃气轮机设计或操作的工程师们以及技术人员, 也会发现这本手册是对他们非常有用的参考文献之一。

Clifford M. Simmang

得克萨斯 T&M 大学机械工程系

# 目 录

## 第一部分 设计理论与实践

<b>1 燃气轮机概述</b> .....	1
1.1 联合循环中的燃气轮机 .....	1
1.2 燃气轮机的性能 .....	5
1.3 燃气轮机设计需考虑的问题 .....	6
1.4 燃气轮机的分类 .....	9
1.5 燃气轮机的主要部件 .....	15
1.6 燃料类型 .....	24
1.7 环境效应 .....	25
1.8 燃气轮机膨胀部分 .....	26
1.9 材料 .....	28
1.10 涂层 .....	30
1.11 燃气轮机热量回收 .....	30
1.12 废热回收系统的补充燃烧 .....	32
1.13 仪表与控制 .....	33
参考文献 .....	33
<b>2 理论与实际循环分析</b> .....	35
2.1 燃气轮机布雷顿循环 .....	35
2.2 实际循环分析 .....	41
2.3 循环分析总结 .....	53
2.4 联合循环电厂概况 .....	54
2.5 压缩空气能量储存循环 .....	58
2.6 增加功率 .....	59
2.7 增加功率方法总结 .....	66
参考文献 .....	70
<b>3 压气机与燃气轮机的性能特性</b> .....	71
3.1 燃气轮机机械气体热力学 .....	71
3.2 气动热方程 .....	74
3.3 效率 .....	78
3.4 量纲分析 .....	79
3.5 压气机性能特点 .....	81
3.6 燃气轮机性能特性 .....	83
3.7 燃气轮机性能参数计算 .....	84

参考文献 .....	89
<b>4 性能与机械标准</b> .....	90
4.1 影响燃气轮机应用的主要因素 .....	90
4.2 性能标准 .....	94
4.3 机械参数 .....	96
4.4 机械标准在燃气轮机中的应用 .....	99
4.5 明细表 .....	110
参考文献 .....	114
<b>5 转子动力学</b> .....	116
5.1 数学分析 .....	116
5.2 振动分析在旋转机械中的应用 .....	124
5.3 转子轴承系统的临界转速计算 .....	127
5.4 电-力系统和模拟 .....	129
5.5 Campbell 图 .....	136
参考文献 .....	139

## 第二部分 主要部件

<b>6 离心压气机</b> .....	140
6.1 离心压气机组件 .....	141
6.2 离心压气机性能 .....	155
6.3 压气机喘振 .....	159
6.4 过程离心压气机 .....	165
参考文献 .....	170
<b>7 轴流压气机</b> .....	173
7.1 概述 .....	173
7.2 叶片和叶栅 .....	175
7.3 基本的翼型理论 .....	177
7.4 压气机工作特性 .....	190
7.5 压气机性能参数 .....	196
7.6 轴流压气机中的压头损失 .....	199
7.7 轴流压气机的新发展 .....	200
7.8 轴流压气机研究 .....	202
7.9 压气机叶片材料 .....	207
参考文献 .....	209
<b>8 径流式涡轮</b> .....	211
8.1 简介 .....	211
8.2 原理 .....	214
8.3 涡轮设计考虑事项 .....	217
8.4 径流式涡轮损失 .....	218



8.5 径流式涡轮性能 .....	220
参考文献 .....	221
<b>9 轴流式涡轮</b> .....	<b>223</b>
9.1 涡轮几何结构 .....	223
9.2 冲击式涡轮 .....	228
9.3 反击式涡轮 .....	230
9.4 涡轮叶片冷却概念 .....	232
9.5 涡轮叶片冷却设计 .....	234
9.6 冷却涡轮气动特性 .....	239
参考文献 .....	242
<b>10 燃烧室</b> .....	<b>245</b>
10.1 燃烧术语 .....	246
10.2 燃烧 .....	246
10.3 燃烧室设计 .....	248
10.4 燃料雾化及点燃 .....	251
10.5 典型的燃烧室布置 .....	254
10.6 空气污染问题 .....	256
10.7 催化燃烧 .....	264
参考文献 .....	267

### 第三部分 材料、燃料技术与燃料系统

<b>11 材料</b> .....	<b>268</b>
11.1 燃气轮机的一般冶金行为 .....	270
11.2 燃气轮机材料 .....	275
11.3 压气机叶片 .....	278
11.4 锻造和无损检测 .....	278
11.5 陶瓷 .....	278
11.6 涂层 .....	279
参考文献 .....	283
<b>12 燃料</b> .....	<b>284</b>
12.1 燃料规格 .....	286
12.2 燃料性能 .....	289
12.3 重质燃料 .....	296
12.4 气体燃料处理 .....	299
12.5 气体燃料净化设备 .....	302
12.6 燃料加热 .....	304
12.7 燃气轮机部件的清洗 .....	305
12.8 燃料的经济性 .....	307
12.9 操作经验 .....	308

12.10 管道系统伴热 .....	309
12.11 液体储存 .....	311
参考文献 .....	313

#### 第四部分 辅助元件

<b>13 轴承和密封</b> .....	314
13.1 轴承 .....	314
13.2 轴承设计原则 .....	320
13.3 自位衬垫滑动轴承 .....	323
13.4 轴承材料 .....	325
13.5 轴承和轴颈不稳定性 .....	326
13.6 推力轴承 .....	328
13.7 影响推力轴承设计的因素 .....	329
13.8 推力轴承功率损耗 .....	329
13.9 密封 .....	330
参考文献 .....	347
<b>14 齿轮</b> .....	350
14.1 齿轮类型 .....	351
14.2 影响齿轮设计的因素 .....	352
14.3 制造过程 .....	357
14.4 安装和初始运行 .....	359
参考文献 .....	360

#### 第五部分 安装、操作和维修

<b>15 润滑</b> .....	362
15.1 基本的油系统 .....	362
15.2 润滑油的选择 .....	367
15.3 油样和测试 .....	367
15.4 油品污染 .....	367
15.5 过滤器的选择 .....	368
15.6 净化和清洗 .....	370
15.7 联轴器润滑 .....	370
15.8 润滑油的管理程序 .....	371
参考文献 .....	372
<b>16 波谱分析</b> .....	373
16.1 振动的测量 .....	377
16.2 磁带数据 .....	379
16.3 振动波谱说明 .....	380
16.4 使用 RTA 的次同步振动分析 .....	383

16.5	次同步谐波波谱 .....	384
	参考文献 .....	388
<b>17</b>	<b>平衡</b> .....	<b>390</b>
17.1	转子的不平衡 .....	390
17.2	平衡过程 .....	394
17.3	平衡技术的应用 .....	397
	参考文献 .....	399
<b>18</b>	<b>联轴器及其对准</b> .....	<b>401</b>
18.1	齿轮联轴器 .....	403
18.2	金属膜片式联轴器 .....	408
18.3	金属圆盘式联轴器 .....	410
18.4	叶轮机械的改进 .....	410
18.5	转轴对准 .....	413
	参考文献 .....	417
<b>19</b>	<b>控制系统和使用仪器</b> .....	<b>419</b>
19.1	控制系统 .....	419
19.2	状态监测系统 .....	426
19.3	生命周期成本 .....	433
19.4	温度的测量 .....	438
19.5	压力的测量 .....	439
19.6	振动测试 .....	440
19.7	辅助系统监测 .....	442
19.8	燃气轮机故障诊断 .....	445
19.9	总结 .....	454
	参考文献 .....	454
<b>20</b>	<b>燃气轮机性能测试</b> .....	<b>456</b>
20.1	概述 .....	456
20.2	性能规范 .....	457
20.3	整流器 .....	458
20.4	燃气轮机测试 .....	462
20.5	燃气轮机 .....	463
20.6	各种关键热段部件的寿命期考虑 .....	466
20.7	性能曲线 .....	466
20.8	性能计算 .....	466
20.9	燃气轮机性能计算 .....	474
20.10	燃气轮机修正因子 .....	476
20.11	振动测量 .....	477
20.12	排放测量 .....	479
20.13	电厂损失 .....	482
	参考文献 .....	483

<b>21 维护技术</b> .....	485
21.1 维护理念 .....	485
21.2 员工培训 .....	491
21.3 工具和工厂设备 .....	494
21.4 燃气轮机启动 .....	498
21.5 重新设计以达到高可靠性 .....	499
21.6 长期服务协议 .....	509
21.7 管道镜检查 .....	511
21.8 燃气轮机组件维护 .....	515
21.9 旧燃气轮机叶片的更新 .....	533
21.10 转子动态系统特性 .....	533
21.11 轴承维护 .....	535
21.12 联轴器维护 .....	546
21.13 修理和复原涡轮机械基座 .....	546
参考文献 .....	548
<b>22 案例</b> .....	549
22.1 轴流压气机 .....	550
22.2 燃烧系统 .....	556
22.3 转换部件 .....	560
22.4 轴流燃气轮机 .....	561
<b>单位换算表</b> .....	578