

Gas Turbines Modeling,
Simulation, and Control
Using Artificial Neural Networks

燃气轮机建模、仿真与控制 ——基于人工神经网络的方法

◎ [新西兰] Hamid Asgari 著
[新西兰] XiaoQi Chen
鲁 峰 李秋红 译

飞行器动力工程专业系列教材

燃气轮机建模、仿真与控制

——基于人工神经网络的方法

**Gas Turbines Modeling, Simulation, and Control
Using Artificial Neural Networks**

〔新西兰〕Hamid Asgari, 〔新西兰〕XiaoQi Chen 著

鲁 峰 李秋红 译

江苏高校品牌专业建设工程资助项目

江苏高校“青蓝工程”资助

科 学 出 版 社

北 京

图字: 01-2018-6594

内 容 简 介

本书系统地阐述了燃气轮机系统的建模、仿真与控制方法,包括燃气轮机建模技术的发展、燃机的白盒建模与控制、黑盒建模与控制、基于人工神经网络的系统辨识、燃机动态过程建模与仿真、起动过程建模与仿真、基于人工神经网络的控制器设计等内容。

本书适合航空发动机、地面燃机等燃气轮机建模、仿真与控制系统设计人员使用,也可作为燃气涡轮机械系统相关的广大科研、设计、教学人员以及高校学生的参考书。

Gas Turbines Modeling, Simulation, and Control: Using Artificial Neural Networks/by Hamid Asgari, XiaoQi Chen/ISBN: 9781138893443

Copyright©2017 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved; 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版,并经其授权翻译出版。版权所有,侵权必究。

Science Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版授权由科学出版社独家出版并仅限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

燃气轮机建模、仿真与控制:基于人工神经网络的方法/(新西兰)哈米德·阿斯加利(Hamid Asgari), (新西兰)陈小奇(XiaoQi Chen)著;鲁峰,李秋红译. —北京:科学出版社,2018. 12

书名原文: Gas Turbines Modeling, Simulation, and Control: Using Artificial Neural Networks

飞行器动力工程专业系列教材

ISBN 978-7-03-059524-9

I. ①燃… II. ①哈… ②陈… ③鲁… ④李… III. ①航空发动机—燃气轮机—研究 IV. ①V235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 258212 号

责任编辑:李涪汁 曾佳佳/责任校对:彭 涛

责任印制:张 伟/封面设计:许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年12月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018年12月第一次印刷 印张:8 3/4

字数:200 000

定价:89.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《飞行器动力工程专业系列教材》编委会

主 编：宣益民

副主编：宋迎东 张天宏 黄金泉 谭慧俊 崔海涛

编 委：（按姓氏笔画排序）

王 彬 毛军逵 方 磊 吉洪湖 刘小刚

何小民 宋迎东 张天宏 陈 伟 陈 杰

陈茉莉 范育新 周正贵 胡忠志 姚 华

郭 文 崔海涛 韩启祥 葛 宁 温 泉

臧朝平 谭晓茗

致 谢

作者要对University of Canterbury(UC)数学和统计系的Raazesh Sainudiin博士和Amir Kabir University of Technology(AUT)电气工程系的Mohammad Bagher Menhaj教授致以诚挚的感谢,感谢他们于本书撰写过程中在研究结果方面的重大帮助。我们也要感谢University of Canterbury机械工程系研究生协调员Mark Jermy和Sid Becker博士、机械工程系主任Milo Kral教授、研究生院院长Lucy Johnston教授,感谢他们的帮助和支持。

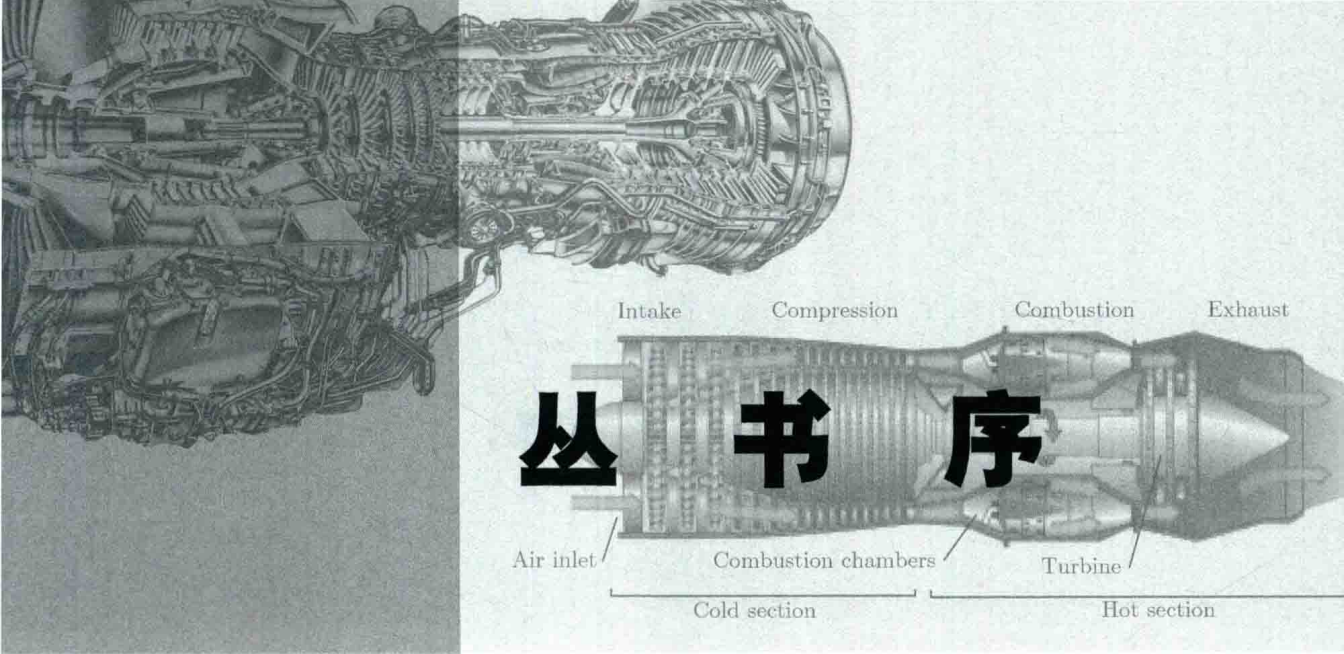
我们还要感谢意大利Università degli Studi di Ferrara “Dipartimento di Ingegneria”系的Pier Ruggero Spina教授、Mauro Venturini教授、Michele Pinelli教授和Mirko Morini博士,感谢他们提供试验数据,以及在Simulink和神经网络模型建立中的密切合作。我们还非常感谢Sharif University of Technology航空航天系的Mohsen Fathi Jegarkandi助教和Malek-Ashtar University of Technology(MUT)的Naser Rahbar博士,感谢他们对作者开发燃气轮机控制系统的大力帮助。我们还真诚地感谢伊朗近海石油公司(Iranian Offshore Oil Company, IOOC),感谢他们在现场考察和数据集中的技术支持和密切合作。

很荣幸地感谢UC录用和注册、ICT服务、体育运动中心、学生服务中心和UC图书馆工作人员的帮助和支持。我们还很感谢所有的一起愉快工作和协作过的UC技术人员、管理人员、研究生同伴、学生和朋友。

作 者

Hamid Asgari, 于2014年获得新西兰克赖斯特彻奇市University of Canterbury (UC)机械工程博士学位。在伊朗德黑兰的Tarbiat Modares University (TMU)获得航空航天工程理科硕士学位,他的机械工程学士学位获得于伊朗德黑兰的Iran University of Science & Technology(IUST)。在专业领域中,他在非常有名望的工业公司作为机械工程带头人和项目协调人工作超过15年。在职业经历中,他是工程队设计、研究与开发和维护计划部门的核心成员。他在技术支持、设计和维护各种机械设备和旋转机械如燃气轮机、泵和压气机方面、在大规模发电厂项目和石油天然气工业上有无价的理论和实践经验。

XiaoQi Chen, 新西兰克赖斯特彻奇市University of Canterbury机械工程系教授。1984年在中国广东华南理工大学获得工程学士学位,他在英国伦敦阿克苏布里奇的Brunel University的材料技术系的硕士研究获得中-英技术合作奖(1985—1986年),博士研究在英国默西塞德郡利物浦市的University of Liverpool电气和电子工程系(1986—1989年)。他是新加坡制造技术研究所高级科学家(1992—2006年),1999年获得新加坡国家技术奖。他的研究方向包括机电系统、移动机器人、辅助器具和制造自动化。



作为飞行器的“心脏”，航空发动机是技术高度集成和高附加值的科技产品，集中体现了一个国家的工业技术水平，被誉为现代工业皇冠上的明珠。经过几代航空人艰苦卓绝的奋斗，我国航空发动机工业取得了一系列令人瞩目的成就，为我国国防事业发展和国民经济建设做出了重要的贡献。2015 年，李克强总理在《政府工作报告》中明确提出了要实施航空发动机和燃气轮机国家重大专项，自主研制和发展高水平的航空发动机已成为国家战略。2016 年，国家《第十三个五年规划纲要》中也明确指出：中国计划实施 100 个重大工程及项目，其中“航空发动机及燃气轮机”位列首位。可以预计，未来相当长的一段时间内，航空发动机技术领域高素质创新人才的培养将是服务国家重大战略需求和国防建设的核心工作之一。

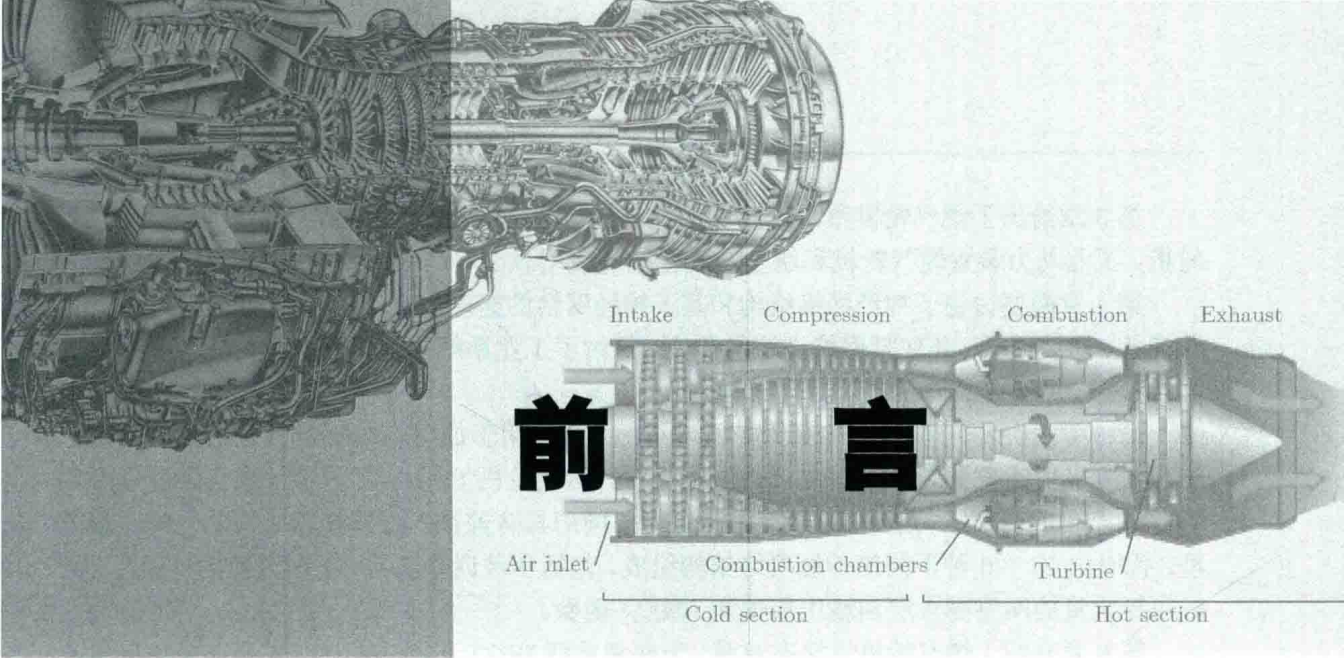
南京航空航天大学是我国航空发动机高层次人才培养和科学研究的重要基地，为国家培养了近万名航空发动机专门人才。在江苏省高校品牌专业一期建设工程的资助下，南京航空航天大学于 2016 年启动了飞行器动力工程专业系列教材的建设工作，旨在使教材内容能够更好地反映当前科学技术水平和适应现代教育教学理念。教材内容涉及航空发动机的学科基础、部件/系统工作原理与设计、整机工作原理与设计、航空发动机工程研制与测试等方面，汇聚了高等院校和航空发动机厂所的理论基础及研发经验，注重设计方法和体系介绍，突出工程应用及能力培养。

希望该系列教材的出版能够起到服务国家重大需求、服务国防、服务行业的积极作用，为我国航空发动机领域的创新性人才培养和技术进步贡献力量。

史道民

南京航空航天大学

2017 年 5 月



燃气轮机 (gas turbines, GT) 是现代工业的重要组成部分之一。它们在航空工业、发电设备、大型泵和压缩机的主要驱动机械中起着关键作用。燃气轮机的建模和仿真一直是这类设备性能优化的有效手段。这一领域开展了大量值得关注的研究，到目前已经建立了许多分析和试验模型，有利于深入理解这些系统的非线性反应和复杂的动力学特征。然而，为了不同的要求和应用，开发精确、可靠的燃气轮机模型的需求，使得研究人员继续研究工作。这一领域的研究包括基于白盒和基于黑盒的模型及其在控制系统中的应用。人工神经网络 (artificial neural networks, ANNs) 作为黑盒方法是适合并能有效完成像燃气轮机这样高度非线性系统的数据处理、建模和控制的工具。此外，由于动力市场的高需求，生产商盼望开展燃气轮机设计、生产、控制和维护方面优化新方法的连续研究。近几十年，人工神经网络被认为是传统建模、仿真和控制方法的可靠替代，表现出高度强大的潜力。

本书提供了新颖的采用人工神经网络的燃气轮机建模、仿真与控制方法。在建模和仿真领域，分别采用 Simulink 和基于神经网络的模型，对两种不同类型的燃气轮机进行了建模和仿真。采用仿真和工作数据集来演示神经网络在模拟燃气轮机复杂非线性动态方面的能力。对于基于人工神经网络的建模，采用了静态网络 (MLP) 和动态网络 (NARX) 方法。为探索稳态和过渡态行为，建立了 Simulink 和 NARX 模型。本书所建模型应用于燃气轮机设计和制造目的时可以离线使用，在现场状态监测、故障检测和故障检修中在线使用。本书提供了燃气轮机建模、仿真与控制的新途径和新方法。

第 1 章讨论燃气轮机建模和控制的动机、必要性和目标，给出了燃气轮机的分类和建模中主要考虑的因素。本章简要解释了在燃气轮机建模过程开始阶段最重要的标准和注意事项，不但包括燃气轮机类型、结构，还包括建模目标、方法。本章还定义了目前在燃气轮机建模、仿真与控制领域存在的问题。最后，简要提供了目前和将来在燃气轮机建模和仿真领域活动的主要目标。

第 2 章基于燃气轮机分类，给出了燃气轮机白盒建模、仿真与控制领域研究活动的综述。本章探讨了不同类型燃气轮机相关的科学原理，包括低功率燃气轮机、工业动力装置燃气轮机 (IPGT) 和航空燃气轮机。

第 3 章给出了燃气轮机黑盒建模、仿真与控制领域的重要研究综述,涵盖了低功率燃气轮机、工业动力装置燃气轮机和航空燃气轮机的模型。

第 4 章简要讨论了神经网络结构和基于神经网络的建模过程,包括系统分析、数据采集与准备、网络结构,还包括网络训练与验证。探讨了工业系统采用基于神经网络的模型的不同挑战,描述了这种方法的优点和局限性。

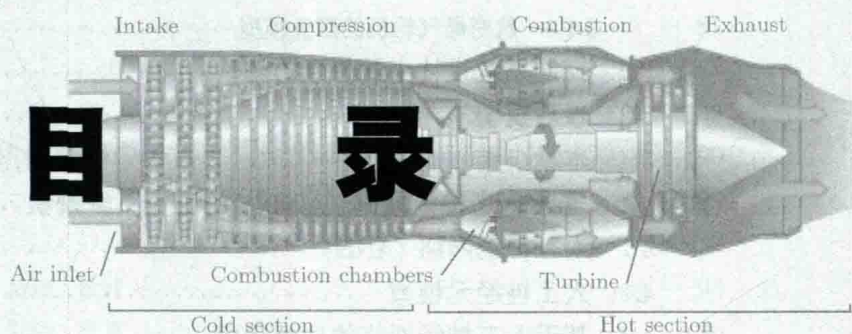
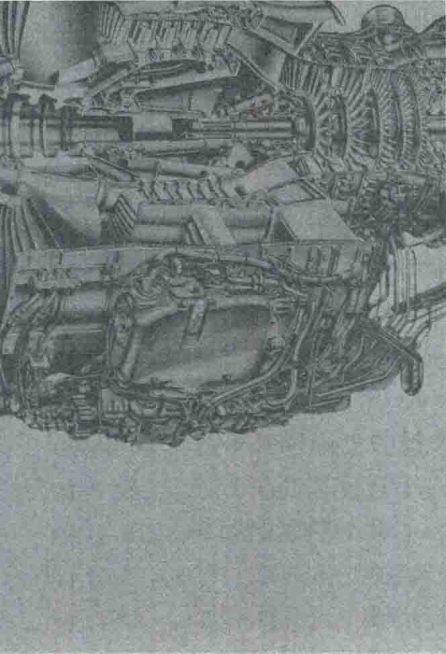
第 5 章介绍了一个新颖的基于神经网络的方法,用于低功率单轴燃气轮机的离线系统辨识。所采用的数据来源于 MATLAB 环境下的燃气轮机 Simulink 模型。综合计算程序代码由 MATLAB 产生并运行,用于产生和训练不同的具有前馈多层感知器结构的神经网络模型。代码由 18 720 种不同的神经网络结构组成,包括各种训练函数、不同数量的神经元,同时包括大量的网络隐含层和输出层传递(激励)函数。

第 6 章介绍了燃气轮机过渡态建模。为探索重型 IPGT 过渡态行为,采用试验数据集生成并验证了 Simulink 和 NARX 模型,结果表明 Simulink 和 NARX 模型成功模拟了系统动态过程。然而, NARX 方法相比 Simulink 方法可以获得更高的模型精度。此外,采用 NARX 模型建立并验证了此 IPGT 的单独起动过程复杂模型。模型的建立和验证基于测得的时间序列数据集。可以看出 NARX 模型具有仿真起动过程和预测燃气轮机动态行为的潜力。

第 7 章利用起动过程试验中获得的数据建立了重型 IPGT 起动过程 NARX 模型。NARX 模型的建立基于两个不同过程的三个测量时间序列数据集。为了验证所获得的模型,将它们用于三个其他可用数据集、对比模型重要输出和对应的测量数据值。

第 8 章阐述了燃气轮机控制器设计的神经网络方法,设计了传统的比例-积分-微分(PID)控制器和包含了神经网络模型预测(MPC)和反馈线性化(NARMA-L2)控制器的基于神经网络的控制器,并用于控制燃气轮机转速。所有控制器的相关参数的调试和设置基于控制器设计需求。结果表明,基于神经网络的控制器(此处为 NARMA-L2)性能比传统的控制器更胜一筹。NARMA-L2 响应的调节时间、上升时间和最大超调低于传统 PID 控制器的相应指标,其对输入信号变化的跟踪比 PID 更精确。

本书可以作为大学毕业生、研究生、研究人员、机械工程师、机电一体化工程师、控制工程师的重要研究来源,以及从事人工智能、神经网络、燃气轮机和工业设备相关工作的燃气轮机制造商和专业人员的重要研究来源。读者可以学会如何使用人工智能解决复杂工艺问题,特别是在燃气轮机领域。本书可以作为燃气轮机建模、仿真与控制领域研究信息的丰富来源。



丛书序

前言

第 1 章	燃气轮机建模简介	1
1.1	燃气轮机的性能	2
1.2	燃气轮机的分类	3
1.3	燃气轮机建模中的注意事项	3
1.3.1	燃气轮机类型	3
1.3.2	燃气轮机结构	4
1.3.3	燃气轮机建模方法	4
1.3.4	燃气轮机控制系统类型和结构	5
1.3.5	燃气轮机建模目的	6
1.3.6	燃气轮机模型的构建方法	7
1.4	问题和局限性	7
1.5	目标和范围	8
1.6	本章小结	9
第 2 章	燃气轮机白盒建模、仿真与控制	10
2.1	燃气轮机的白盒建模和仿真	10
2.1.1	低功率燃气轮机的白盒模型	10
2.1.2	工业动力装置燃气轮机的白盒模型	11
2.1.3	航空燃气轮机的白盒模型	16
2.2	控制系统设计中的白盒方法	18
2.3	最后说明	19
2.4	本章小结	20
第 3 章	燃气轮机黑盒建模、仿真与控制	21
3.1	燃气轮机的黑盒建模和仿真	21

3.1.1	低功率燃气轮机的黑盒模型	21
3.1.2	工业动力装置燃气轮机的黑盒模型	22
3.1.3	航空燃气轮机的黑盒模型	24
3.2	控制系统设计中的黑盒方法	25
3.3	最后说明	28
3.4	本章小结	29
第 4 章	基于人工神经网络 (ANN) 的工业系统辨识	30
4.1	人工神经网络 (ANN)	30
4.2	人工神经元模型	31
4.3	基于人工神经网络的建模步骤	32
4.3.1	系统分析	32
4.3.2	数据采集与准备	33
4.3.3	网络架构	33
4.3.4	网络训练与验证	34
4.4	人工神经网络在工业系统中的应用	37
4.5	人工神经网络局限	38
4.6	本章小结	39
第 5 章	单轴燃气轮机的建模与仿真	40
5.1	燃气轮机的 Simulink 模型	40
5.2	基于 ANN 的系统辨识	44
5.2.1	数据生成	44
5.2.2	训练过程	45
5.2.3	代码生成	46
5.3	模型选择过程	47
5.4	本章小结	54
第 6 章	IPGT 动态特性建模与仿真	56
6.1	GT 技术参数	57
6.2	数据采集与准备	57
6.3	Simulink: MATLAB 建立 IPGT 的物理原理模型	58
6.3.1	测量参数	59
6.3.2	计算及估计参数	59
6.3.3	模型结构	61
6.3.4	基于物理原理的建模方法的相关讨论	66
6.4	IPGT 的 NARX 模型	66
6.5	基于物理学原理的模型与 NARX 模型对比	68
6.6	本章小结	76
第 7 章	利用 NARX 模型对 IPGT 的起动过程进行建模与仿真	78
7.1	燃气轮机起动	78

7.2 数据采集与准备 79

7.3 使用 NARX 模型对燃气轮机起动建模 80

7.3.1 NARX 模型训练 81

7.3.2 NARX 模型验证 82

7.4 本章小结 89

第 8 章 基于神经网络的燃气轮机控制器设计 90

8.1 燃气轮机控制系统 90

8.2 模型预测控制器 92

8.2.1 基于人工神经网络的 MPC 设计 93

8.2.2 基于人工神经网络的 MPC 仿真 96

8.3 反馈线性化控制器 (NARMA-L2) 97

8.3.1 NARMA-L2 控制器设计 98

8.3.2 NARMA-L2 控制器仿真 100

8.4 PID 控制器 101

8.4.1 PID 控制器设计 101

8.4.2 PID 控制器仿真 103

8.5 控制器性能对比 103

8.6 非最小相位系统 106

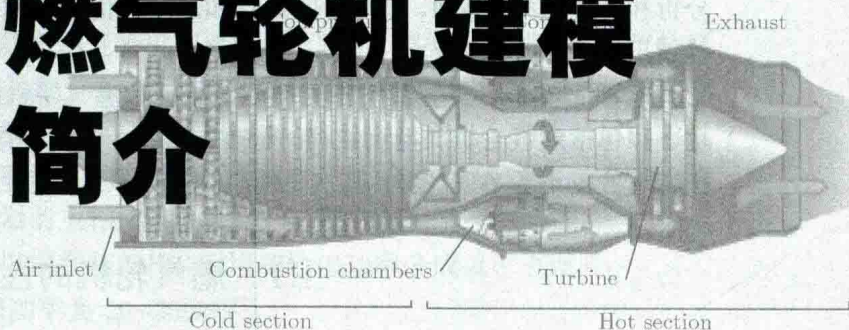
8.7 本章小结 107

参考文献 108

索引 123

第1章

燃气轮机建模简介



万物皆有因，除了公理，任何事物的成因都不可能完整全面地直接获得。

—— 伊本·辛纳，阿维森纳

波斯博学家，980—1037 年

燃气轮机是一种内燃机，利用空气的气体能量将燃料的化学能转化为机械能。它旨在尽可能多地从燃料中提取能量^[1]。在过去的 50 年里，越来越多的燃气轮机在发电厂和海上平台的工业设备和公用设施上服役。燃气轮机具有质量轻、结构紧凑以及可采用多种燃料等特点^[2]，使其备受关注。虽然燃气轮机的发明和使用具有悠久的历史，但直到 20 世纪 30 年代，英国的 Frank Whittle 和他的同事才开发出第一个用于喷气式飞机发动机的燃气涡轮机械^[3]。燃气轮机在第二次世界大战后迅速发展并成为许多工业设备动力系统的主要选择，这是因为空气动力学、冷却系统和高温材料等不同科学领域的进步显著提高了发动机的效率。因此，燃气轮机受欢迎程度逐年提高并不奇怪。它们有能力提供可靠和连续的动力。在石油化工厂、油田平台、加油站和炼油厂等工业领域中几乎所有可用的机械电气设备和机械装置的运行都取决于燃气轮机所产生的功率。燃气轮机在世界各地尤其是电力设备的广泛应用归功于其可靠性、可用性、适应性、快速起动能力、低初始成本和短交货期。它们不依靠冷却水，可以使用各种燃料。在夏季可提供高负载增长率，并快速响应负载变化^[4]。

近年来，特别是在燃气轮机的建模和仿真领域进行了大量的研究和应用。这是因为现代工业对燃气轮机的需求和使用变得更加迫切。在最终设计、加工和制造之前，创建燃气轮机及其相关控制系统的模型一直是设备性能优化的有效途径，并且能节约成本。燃气轮机模型还可用于非设计性能预测、排放评估、轮机蠕变后剩余寿命以及发动机控制规律设计^[5]。数学建模被认为是系统建模的一般方法，它使用数学语言来描述和预测系统的行为。

为了克服与燃气轮机相关的经济和工程问题^[6]，并实现可靠的和具体成本效益的设计^[7]，人们在开发燃气轮机方面做出了巨大努力。优化燃气轮机的设计、性能和维护的最佳方法之一是离线建模和仿真。它以不同的方式帮助制造商和用户，制造商可以在设计和制造过程中

评估和优化特定型号燃气轮机的性能，模型也可以由运营商和现场工程师在网站上在线使用，用于状态监测、传感器验证、故障检测、故障排除等。目前已经建立了多种燃气轮机的分析和实验模型。然而，针对不同目标和应用的优化模型的需求一直是研究人员继续在这一领域工作的强大动力。

本章简要介绍典型燃气轮机性能的原理和燃气轮机的分类。燃气轮机建模中的主要注意事项包括燃气轮机类型和结构、建模方法、控制系统类型和结构以及建模目的和方法，将在本章的以下各节中解释；其次是问题和约束以及建模目标。

1.1 燃气轮机的性能

燃气轮机基于布雷敦循环工作：图 1.1 显示了典型的单轴燃气轮机及其主要部件，包括压气机、燃烧室和涡轮。这些组件被称为发动机核心机或燃气发生器 (gas generator, GG)。压气机和涡轮与转轴连接，并且它们一起旋转。

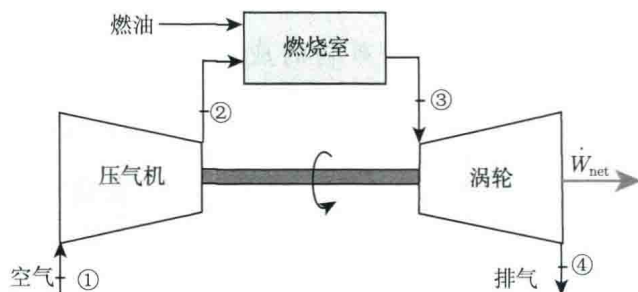


图 1.1 典型单轴燃气轮机的示意图

图 1.2 分别给出了理想布雷敦循环的压力-体积 (P - V) 图和温-熵 (T - S) 图^[8]。如图 1.2 所示，空气在 1 截面进入压气机，并通过压气机压缩。热的高压空气在 2 截面进入燃烧室。在燃烧室中，燃料与空气混合并点燃。作为燃烧产物的热气体在 3 截面后被压入涡轮并使其旋转。涡轮驱动压气机和燃气发生器机械输出，可以用作发电站大型泵或大型压缩机中的电力交流发电机。压气机 (1-2) 和涡轮 (3-4) 中的理想过程是等熵的。燃烧室 (2-3) 和环境 (4-1) 中的理想循环是等压过程。但是，压气机和涡轮中的实际过程是不可逆的和非等熵的。在燃烧室的过程中也有压力损失。忽略空气过滤器和燃烧室中的压力损失，过程 2-3 和过程 4-1 可以被认为等压的^[9]。

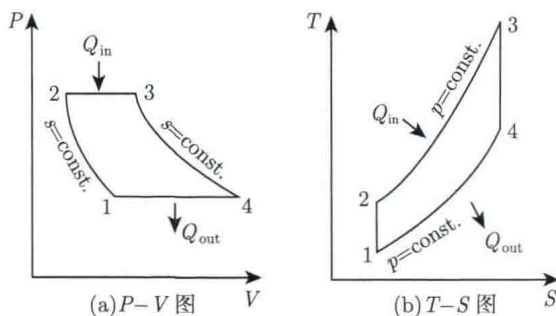


图 1.2 压力-体积和温-熵图中的典型布雷敦循环

1.2 燃气轮机的分类

燃气轮机可分为两大类，包括航空燃气轮机和地面燃气轮机。在航空工业中，燃气轮机被用作推进系统来产生推力推动飞机在空中飞行。推力通常基于牛顿第三定律产生。航空燃气涡轮机械包括涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机和涡轮螺旋桨发动机。在地面燃气轮机中，燃气发生器可以连接到电动发电机、大型泵或压缩机上，分别用于制造涡轮发电机、涡轮泵或涡轮压缩机。如果燃气发生器的主轴连接到发电机，则它可用于产生电能。

在另一个分类中，燃气轮机可以根据其结构、应用和输出功率分成以下五组^[2]：

- 微型燃气轮机 (MGT)，输出功率为 20~350kW；
- 用于简单循环应用的小型燃气轮机，输出功率为 0.5~2.5MW，效率为 15%~25%；
- 用于航空航天工业的航空燃气轮机，功率为 2.5~50MW，效率为 35%~45%；
- 用于大型发电机组的框架式重型燃气轮机 (HDGT)，输出功率为 3~480MW，效率为 30%~46%；
- 广泛应用于石油化工厂的工业型燃气轮机，输出功率为 2.5~15MW，效率为 30%~39%。

在本书中，微型燃气轮机和小型燃气轮机被认为是低功率燃气轮机，用于发电的发电厂的工业型和重型燃气轮机被称为工业动力装置燃气轮机 (IPGT)。工业动力装置燃气轮机在发电方面发挥着关键作用，特别是对于远在油田和海上的工厂，这些工厂无法连接到通用电网。

1.3 燃气轮机建模中的注意事项

在燃气轮机建模之前，应该仔细考虑以下基本因素。燃气轮机类型、燃气轮机结构、建模方法、控制系统类型和结构以及建模目的都属于重要的标准^[10]。

1.3.1 燃气轮机类型

作为建模的第一步，需要获得足够的有关燃气轮机类型的信息，因为燃气轮机可以是航空或地面燃气轮机。尽管基于其在工业上的应用有不同类型的燃气轮机，但它们具有相同的主要通用部件，包括压气机、燃烧室和涡轮。图 1.3 展示了一个典型的单轴航空燃气轮机发动机^[11]。

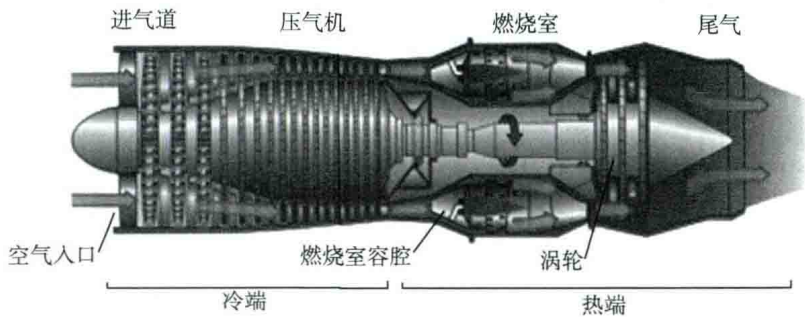


图 1.3 一个典型的单轴航空燃气轮机发动机

1.3.2 燃气轮机结构

燃气轮机的结构是燃气轮机建模的另一个重要标准。尽管所有燃气轮机几乎都具有相同的基本结构和热力学循环,但详细研究时还是有相当大的区别。例如,为了增强燃气涡轮循环、系统效率或输出功率,通常会采用不同的方法,比如再加热、中间冷却或热交换,或使用特定的燃气轮机结构。燃气轮机也可以根据其轴的类型进行分类,它们可能是单轴或分轴(双轴或三轴)。在单轴燃气轮机中,相同的涡轮转子通过减速器连接到动力输出轴驱动压气机。在分轴燃气轮机中,燃气涡轮和动力涡轮(power turbine, PT)在机械上分开。燃气涡轮也称为压气机涡轮(compressor turbine, CT)或高压涡轮(high-pressure turbine, HP),用于提供驱动压气机和附件所需的动力。而动力涡轮也被称为低压涡轮(low-pressure turbine, LP),用于提供输出功率。图 1.4 展示了一个典型的双轴燃气轮机发动机^[12]。

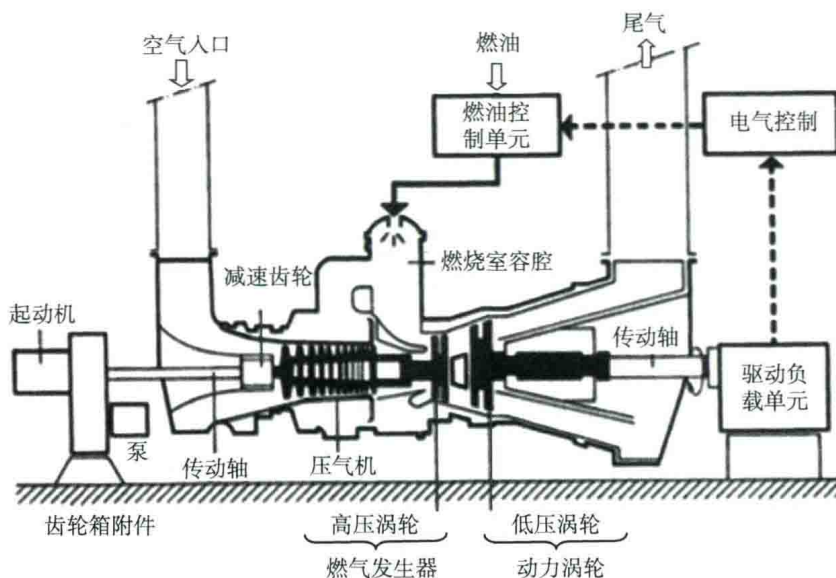


图 1.4 一个典型的双轴燃气轮机发动机^[12]

1.3.3 燃气轮机建模方法

燃气轮机的建模与仿真在制造高效、可靠和耐用的燃气轮机中起着关键作用。此外,燃气轮机模型还可用于工业现场优化、状态监测、传感器验证、故障检测、故障排除等。这些事实一直是科学家继续在这个领域进行研究的强大动力。关于燃气轮机的建模和控制模型有很多案例,迄今为止已经有从不同的角度为不同的目的建立了各种燃气轮机模型。尽管一些研究人员如 Visser 等^[13]试图使用商业软件为燃气轮机建立通用模型,但是目前主流的方法仍然形式多样、方法各异。

数学建模作为系统建模的一般方法,使用数学语言来描述和预测系统的行为。科学领域的重要进展和发展与数学模型的质量及其与实验测量结果的一致性有关。基于物理的建模是数学建模的主要分支。这意味着该系统符合物理定律,从而实现物理上逼真的模拟。基于物理学的建模采用数学物理方程式,并结合实时传感器测量来建立适合操作使用的模型。数学模型可以分为“线性和非线性”“确定性和随机性(概率)”“静态和动态”或“离散和连续”^[14]。

1.3.3.1 线性和非线性模型

如果系统的所有目标函数和约束均由线性方程表示，则称该模型为线性。否则，它被认为是一个非线性模型。尽管工业设备通常表现出非线性行为，但在许多情况下，模型被简化为线性分析。对非线性系统进行线性化有多种不同的方法。然而，在建立一个能够准确预测燃气轮机等复杂敏感系统行为的模型时，考虑非线性动力学是不可避免的。

1.3.3.2 确定性和随机（概率）模型

从另一个角度来看，模型可以是确定性的或随机的。在确定性模型中，所有变量状态由模型中的参数和这些变量的前一组状态唯一确定。因此，由于可测量变量和派生变量之间的确切关系，确定性模型没有不确定性。相反，在随机模型中，变量数值用随机变量或随机过程来描述。因此，在随机模型中，变量状态使用随机概率分布来描述^[14]。

1.3.3.3 静态模型和动态模型

表征系统的变量通常会随着时间而改变。如果这些变量之间存在直接的即时关系，则系统为静态。如果一个系统的变量没有因直接的外部影响而改变，以致它们的值取决于之前的信号，则该系统为动态^[14]。

1.3.3.4 离散模型和连续模型

当描述连续时间信号之间的关系时，数学模型被称为连续时间模型。连续时间模型用随时间连续变化的函数 $f(t)$ 表示。当模型直接表示离散时刻信号值之间的关系时，称为离散时间模型。信号值之间的关系通常用差分方程来表示。在实际应用中，信号通常以离散采样方式获得^[14]。

1.3.4 燃气轮机控制系统类型和结构

燃气轮机的建模和控制中最重要的因素之一是其控制系统的类型和结构。控制系统是任何工业设备的重要组成部分。控制系统的类型和结构与系统动态的复杂性以及整个执行期间所定义的任务密切相关。缺乏合适的控制系统会导致严重的问题，如压气机喘振、过热、超速等^[15]。这些问题的最终结果可能是系统关闭并严重损害燃气轮机的主要部件。

所有燃气轮机的控制系统有三个主要功能，包括“启动和停车时序控制”“稳态或运行控制”和“防止过热、超速、过载、振动、熄火和润滑损失的保护控制”。在具有多个燃气轮机的电力网络中，所有单独的控制系统与中央分布式控制系统 (distributed control system, DCS)^[2] 紧密连接。燃气轮机的控制系统 (control system of gas turbines, CSGT) 可以是开环或闭环的。在开环控制系统中，操作变量被手动定位或通过使用预定程序定位。而为了控制闭环控制系统中的装置，使用测量数据过程参数的一个或多个变量来移动操纵变量。为保持闭环控制系统的有效性和适用性，控制器应与过程参数^[2] 适当相关。图 1.5 和图 1.6 分别展示了典型过程的开环和闭环控制系统框图。



图 1.5 开环控制系统的框图

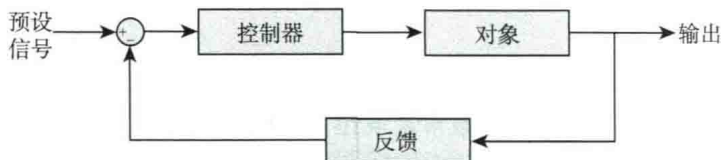


图 1.6 闭环控制系统的框图

1.3.5 燃气轮机建模目的

燃气轮机的模型有许多不同的目的，例如状态监测、故障检测和诊断、传感器验证、系统辨识以及控制系统的设计与优化。因此，明确的建模目的是建立一个成功的燃气轮机模型的必要条件。

1.3.5.1 状态监测

建立燃气轮机模型的目的之一是状态监测。状态监测被认为是预防性维护的主要部分。它评估燃气轮机的运行健康状况，并提前指出潜在的故障警告，帮助操作员采取预防性维护计划中预测的适当措施^[16]。状态监测是维护计划中非常有用的工具，可用于避免意外故障。通过在系统发生任何严重损坏之前预测故障，可以有效防止生产损失、超时和加急成本。为了最大限度地减少非常重要和昂贵的设备（如燃气轮机）的维护成本，有必要监测设备重要部分和敏感部分的运行状况，并不断获取相关数据以供进一步分析。良好的状态监测减少了错误决策的数量，最大限度地减少了对部件的需求，并降低了维护成本。良好的维护系统应该能够监测燃气轮机的所有重要参数，如振动、温度、压力、转速、负载、油位和质量等。此外，它应该能够预测系统的未来状态，并防止不必要的关闭以及致命的故障。

1.3.5.2 故障检测和诊断

创建燃气轮机模型可以预测和检测系统中的故障。当操作员想要从预防性维护转变为预测性维护以降低维护成本时，故障诊断就作为重要和有效的工具^[17]。它包括监视系统以确定何时发生故障以及确定故障的类型和位置。

1.3.5.3 传感器验证

燃气轮机模型可用于传感器验证。传感器是任何工业设备的重要组成部分。如果没有可靠和精确的传感器，设备的监测和控制系统将无法正常工作，甚至可能面临停机。传感器验证涉及故障传感器的检测、隔离和重构。它可以提高系统的可靠性和可用性，并降低维护成本。它增强了设备的可靠性和人员的安全性。传感器验证也是防止不必要的维护或关机的有效工具。它对增加设备的使用寿命和确保可靠的性能具有相当大的作用。它可以通过为诊断和监测系统提供有效的数据来加强系统的自动化。

1.3.5.4 系统辨识

燃气轮机建模的主要目的之一是系统识别。系统识别通过系统的一系列测量推断出一个数学描述，该描述是动态系统的模型^[18]。尽管在过去几十年中在这一领域进行了大量研究，但仍然需要具有更高准确度和可靠性的燃气轮机模型用于系统识别，这是由于燃气轮机动力学的非线性和复杂性。