



能源与环境出版工程
(第二期)

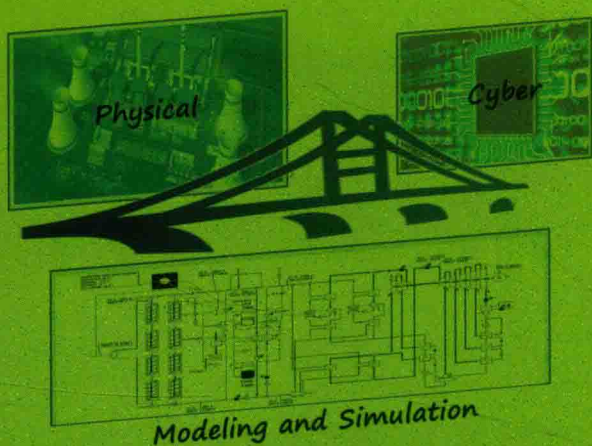
总主编 翁史烈

“十三五”国家重点图书出版规划项目
上海市文教结合“高校服务国家重大战略出版工程”资助项目

热力系统建模与仿真技术

Modeling and Simulation Technology for
Thermal Power System

张会生 周登极 编著



非
外
借



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



能源与环境出版工程

(第二期)

总主编 翁史烈

“十三五”国家重点图书出版规划项目

上海市文教结合“高校服务国家重大战略出版工程”资助项目

热力系统建模与仿真技术

Modeling and Simulation Technology for
Thermal Power System

张会生 周登极 编著



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

内容提要

本书是一本将建模与仿真的方法应用于热力系统的分析和试验过程的专业书。全书共分四篇,第一篇为概念先导篇,主要对建模与仿真的基本概念进行了阐述;第二篇为建模篇,对机理建模、数据驱动建模、混合建模等热力系统常用的建模方法进行了分析;第三篇为仿真篇,对模块化建模与仿真技术、代数方程的求解方法、微分方程的求解方法进行了详细的介绍;第四篇为实战应用篇,结合近年来的科研工作,给出了热力系统典型部件模块库的开发流程和方法,对一些典型的热力系统,介绍了相应的系统仿真模型和结果。

本书可作为热能动力专业的高层次人才培养教学用书,也可供广大工程技术人员参考,尤其是热力系统仿真相关领域的管理及技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

热力系统建模与仿真技术/张会生,周登极编著. —上海:上海交通大学出版社,2018

能源与环境出版工程

ISBN 978-7-313-19255-4

I. ①热… II. ①张…②周… III. ①热力系统—系统建模②热力系统—系统仿真 IV. ①TK284.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 071590 号

热力系统建模与仿真技术

编 著:张会生 周登极

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出版人:谈毅

印 制:苏州市越洋印刷有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

字 数:283千字

版 次:2018年10月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-19255-4/TK

定 价:108.00元

地 址:上海市番禺路951号

电 话:021-64071208

经

印

印



次:2018年10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:0512-68180638

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(西安交通大学教授、中国科学院院士)

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,短短十余年间(2002—2017 年),全世界一次能源总消费从 96 亿吨油当量增加到 135 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。世界能源版图也发生重大变化。

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 82 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 38.3 亿吨油当量竟有 51.3% 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,深化能源体制改革、完善能源市场、加强能源科技的研发,努力建设绿色、低碳、高效、安全的能源大系统。

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、能源经济、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,截至 2018 年初,丛书中已有 9 本输出至 Springer,1 本输出至 John Wiley & Sons。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。

“能源与环境出版工程”从 2013 年底开始陆续出版,并受到业界广泛关

注,取得了良好的社会效益。从2014年起,丛书已连续5年入选了上海市文教结合“高校服务国家重大战略出版工程”项目。还有些图书获得国家级项目支持,如《现代燃气轮机装置》《除湿剂超声波再生技术》(英文版)、《痕量金属的环境行为》(英文版)等。另外,在图书获奖方面,也取得了一定成绩,如《机动车可吸入颗粒物排放与城市大气污染》获“第四届中国大学出版社优秀学术专著二等奖”;《除湿剂超声波再生技术》(英文版)获中国出版协会颁发的“2014年度输出版优秀图书奖”。2016年初,“能源与环境出版工程”(第二期)入选了“十三五”国家重点图书出版规划项目。

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!

肖文烈

2018年9月

前 言

建模与仿真是一种基础的科学与工程方法,随着计算机技术的发展,其研究方法也有了新的发展,形成了一门崭新的综合性学科——系统建模与仿真,被喻为是“继科学理论和实验研究后的第三种认识和改变世界的工具”。系统建模与仿真最早起源于自动控制技术领域,至今已有近70年的历史。随着计算机软、硬件的发展以及工程方法的跨学科应用趋势,其从最初的电子、机械系统领域逐步延伸至机、电、液、热、气、电、磁等各专业领域,已发展成现代科学与工程领域不可或缺的一种方法。热力系统是一种非常复杂、具有多学科交叉特性和自身独特属性的对象。为了更好地将建模与仿真的方法应用于热力系统的分析和试验中,迫切需要一部系统阐述热力系统建模与仿真方法及应用的著作。

全书共分四篇,第一篇为概念先导篇,主要对建模与仿真的基本概念进行了阐述;第二篇为建模篇,分别介绍了基于守恒方程的建模技术、数据驱动建模技术、混合建模技术和灰色模型四部分,涵盖了机理建模、数据驱动建模等热力系统常用的建模方法,为热力系统的建模提供了手段和方法;第三篇为仿真篇,对模块化建模与仿真技术、代数方程的求解方法、微分方程的求解方法进行了详细的介绍,为热力系统的仿真分析提供了指导;第四篇为实战应用篇,结合近年来的科研工作,给出了热力系统典型部件的建模过程和仿真模块库,在此基础上,以一些典型的热力系统为例,介绍了相应的系统仿真模型和结果。在成文过程中,为了避免不必要的重复,在正文之前添加了符号表和缩略语,各物理量和符号在文中不再进行重复说明。本书可作为热能动力专业的高层次人才培养教学用书,也可以供广大工程技术人员参考,尤其是热力系统仿真相关领域的管理及技术人员。

本书得以成稿,一方面是课题组各位老师的大力帮助,另一方面则是基于多年来研究生教学过程中对教学内容的整理和科研项目的结合。感谢课题组研究生陈金伟、马世喜、韦婷婷、梁茂宗以及李景轩等在本书编写过程中提供的帮助。

本书涉及面广,著者水平有限,存在疏漏谬误之处,恳请使用本书的专家、读者批评指正。

张会生 周登极

2018年3月

符 号 表

第 1 章

u	系统输入变量
y	系统输出变量
q	系统状态变量, 流量
t	时间
J	转动惯量
R	电阻
L	电感
K	受扭杆
B	摩擦面
C	电容
e	电压源
I	惯性

第 2 章

OUT	出口
IN	进口
STORAGE	储存
c_p	比热
w	质量流量
M	质量
V	速度
p	压力
P_w	湿周
A	面积
τ_w	切应力
W	重力

e	内能, 管壁粗糙度
ρ	密度
h	焓, 传热系数, 沸腾系数
q	换热量
μ	黏性系数
r	半径
k	热传导率
L	长度
Re	雷诺数
D	特征尺度
Pr	普朗特数
d_i	管道内径
L	长度
T_b	集总温度
T_f	薄膜温度
F_a	管道排列因子
d_o	管道外径
σ	Stefan-Boltzmann 常数
T	温度
UA	导热率
R	热阻
f	摩擦因子
F	反应方程系数
ΔH	高度差
C	流导系数
A, B	Darcy 摩擦因子计算系数

第 3 章

u	研究对象的输入
y	研究对象的实际输出
\hat{y}	数据驱动模型的输出
e	研究对象与数据驱动模型 的输出量之间的偏差
n	模型输出的阶次
m	模型输入的阶次
z^{-1}	滞后算子
x	状态变量
$f/g/h$	非线性函数
l	输入输出数据的长度
n_0	系统的实际阶次
J	损失函数
p	模型中独立参数的数目
e	最小二乘法拟合的残差
θ	待求参数
$w(i)$	目标对应权重
W	权矩阵
$\hat{\theta}_w$	θ 的加权最小二乘估计值
x_i	输入数据
y_i	输出数据
l	训练集中训练数据的个数

第 4 章

n_1	燃气发生器转速
n_2	动力涡轮转速
P_1	压气机入口压力
T_1	压气机入口温度
ΔP_2	压气机出口压力的偏差
ΔT_2	压气机出口温度的偏差
ΔP_{34}	燃气发生器出口压力偏

差

ΔT_{34}	燃气发生器出口温度偏差
ΔQ	压气机折合流量的偏差
ΔE	压气机效率的偏差
π	压气机压比

第 5 章

X	数据序列
D	序列算子
p	序列中数据个数
n	模型中因素的变量数
x	序列中单个数据
x_0	参考序列
x_k	比较序列
\bar{x}	序列的平均值
M	序列 X 的最大值
m	序列 X 的最小值
σ	样本标准差
ξ_{0i}	关联系数
γ	关联度
ρ	分辨系数
ε_{ij}	基于相似性视角的灰色 关联度
ρ_{ij}	基于接近性视角的灰色 关联度
ε_{pg}	三维灰色绝对关联度

第 6 章

P	压力
w	流量
T	温度
\dot{q}	热量
J	转动惯量
ω	转速
M	转矩

m	质量	P_{best_k}	粒子历史最优位置
c	比热	G_{best_k}	全局粒子历史最优位置
V	体积	v_{max}	粒子最大速度
R	气体常数	c_1, c_2	加速系数
t	时间	α	布谷鸟算法步长
λ	热导率	P_a	布谷鸟发现外来蛋概率
δ	壁面厚度	E	神经网络能量函数
f	摩擦系数	第 8 章	
第 7 章		$y(x)$	常微分方程函数
m_1	物质进入控制容积	x	状态变量
m_e	物质离开控制容积	x_0	状态变量初值
m_2	控制容积最终贮存的质量	ρ	烟气密度
m_1	最初贮存的质量	$\frac{dh}{dt}$	烟气焓值变化率
E_2	系统最终贮存的能量	T_g	烟气温度
E_1	最初贮存的能量	$x(t)$	微分方程解析解
u	内能	h	步长
$V^2/2$	动能	第 9 章	
gz	重力位能	π	压比
δQ	过程可逆系统所吸收的热量	n	转速
S	熵	G	流量
g	单位物量的吉布斯函数	P	压力, 功率
c	多变过程比热	η	效率
γ	多变指数	SM	喘振裕度
$F(x)$	目标函数	GF	燃料量
$E(m_0)$	目标函数	H	焓
P	概率	ρ	密度
T	温度	k	绝热指数
α	退温速率	R	气体常数
L	步长	V	体积
d	搜索维度	ξ	燃烧室总压损失
Np	粒子数量	I	转动惯量
k	粒子更新迭代次数	K	平衡常数
		m	质量流量

n	气体组分体积分数	hl	热侧出口
HHV	煤的高热值	ce	冷侧进口
δ	厚度	cl	冷侧出口
Q	热量	sat	饱和态
C	流量系数	foul	污垢
Y	阀门开度	tube	管道
上标		F	Fanning 摩擦
第 5 章		H	水力直径
(0)	原始数据	atm	大气
(1)	一次处理后的数据	第 5 章	
下标		i	序列的第 i 个数据
第 1 章		第 6 章	
m	输入变量个数	p	定压比热
p	输出变量个数	第 9 章	
第 2 章		1	进口
e	进口	2	出口
l	出口	max	最大值
se	固体控制面进口	r	参考值
sl	固体控制面出口	in	进口
avg	平均	out	出口
y	纵向	c	压气机
x	横向	s	喘振边界
rad	辐射	f	燃料
fg	气化	B	燃烧室, 气化反应
f	饱和液体	t	涡轮机
g	饱和气体	SC	水蒸气-碳反应
boil	沸腾	M	甲烷反应
gas	气体	cv	临界温度
shell	壳侧	sl	渣层
wall	管壁	g	气体
he	热侧进口	w	壁面

名称缩写及中英文对照

缩写	全称	中文全称
ARX	auto regressive exogenous	自回归平均模型
LMTD	logarithmic mean temperature difference	对数平均温差
AIC	Akaike's information criterion	赤池信息标准
NARX	nonlinear auto regressive exogenous	非线性自回归平均模型
FPE	final prediction error	最终预报误差准则法
LS	least square method	最小二乘法
IGV	inlet guide vanes	(压气机)进口导向叶片
GM	grey model	灰色模型
AGO	accumulating generation operator	累加生成算子
IAGO	inverse accumulating generation operation	累减生成算子
GA	genetic algorithm	遗传算法
SA	simulated annealing	模拟退火算法
PSO	particle swarm optimization	粒子群优化算法
CS	cuckoo search	布谷鸟算法

目 录

第1篇 概念先导篇

第1章 热力系统建模与仿真概论	003
1.1 热力系统建模与仿真基本概念	003
1.1.1 仿真技术	003
1.1.2 计算机仿真	004
1.1.3 系统建模	005
1.1.4 模型求解	006
1.1.5 热力系统	007
1.2 建模与仿真的发展历程	007
1.2.1 热力系统建模	008
1.2.2 热力系统仿真	008
1.3 建模与仿真基础	010
1.3.1 变量分类	010
1.3.2 系统模型分类	011
1.3.3 空间分布模型	012
1.3.4 时间变量的连续性	013
1.3.5 因变量的量化	013
1.3.6 参数变化	014
1.3.7 叠加性	015
1.3.8 相似系统	016
参考文献	017

第2篇 建模篇

第2章 基于守恒定律的动态模型建立	021
2.1 基本守恒方程的建立	021
2.1.1 偏微分方程表达式	021
2.1.2 常微分方程表达式	025
2.1.3 守恒方程的变换	029
2.1.4 守恒方程的其他表达形式	033
2.2 常规辅助方程的建立	036
2.2.1 传热过程	037
2.2.2 流动过程	048
2.2.3 燃烧过程	051
2.3 本章小结	052
参考文献	052
第3章 数据驱动建模	054
3.1 数据驱动建模的基本概念	054
3.1.1 数据驱动建模定义与基本原理	054
3.1.2 数据驱动建模发展历史	055
3.2 数据驱动建模过程	056
3.2.1 建模步骤	057
3.2.2 基本要素	058
3.2.3 数据驱动模型	059
3.2.4 模型结构参数	060
3.3 线性系统的数据驱动建模方法	062
3.3.1 最小二乘法	062
3.3.2 加权最小二乘法	064
3.4 非线性系统的数据驱动方法	065
3.4.1 非线性模型回归方法简介	065
3.4.2 支持向量回归机	067
3.5 热力系统数据驱动模型建模案例	072
3.5.1 燃料电池温度模型	072