

智能电网 关键技术研究与应用丛书

新能源发电过程的 动态建模、仿真 和控制

Dynamic Modeling, Simulation
and Control
of Energy Generation

[英] 兰詹·文帕 (Ranjan Vepa) 著
周蓉 滕婧 张莹 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

智能电网关键技术研究与应用丛书

新能源发电过程的动态建模、仿真和控制

[英] 兰詹·文帕 (Ranjan Vepa) 著
周蓉 滕婧 张莹 等译



机械工业出版社

Translation from English language edition:
Dynamic Modeling, Simulation and Control of Energy Generation
by Ranjan Vepa

Copyright © 2013 Springer – Verlag London
Springer is part of Springer Science + Business Media
All Rights Reserved

This title is published in China by China Machine Press with license from Springer. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao 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.

本书由 Springer 出版社授权机械工业出版社在中华人民共和国境内地区（不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01 - 2016 - 0086 号。

图书在版编目（CIP）数据

新能源发电过程的动态建模、仿真和控制 /（英）兰詹·文帕（Ranjan Vepa）著；周蓉等译．—北京：机械工业出版社，2018.5

（智能电网关键技术研究与应用丛书）

书名原文：Dynamic Modeling, Simulation and Control of Energy Generation
ISBN 978-7-111-59726-1

I. ①新… II. ①兰… ②周… III. ①新能源—发电—设计 IV. ①TM61

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 081861 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：顾 谦 责任编辑：顾 谦

责任校对：郑 婕 封面设计：鞠 杨

责任印制：常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2018 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 19 印张 · 373 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-59726-1

定价：89.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

金书网：www.golden-book.com

教育服务网：www.cmpedu.com

本书讨论了对一系列能源系统进行动态建模、仿真和控制的核心问题，包括燃气轮机、风力机、燃料电池和电池等。这些建模和控制原理也同样适用于其他非常规发电系统，如太阳能和波浪能发电。本书的主要特点在于，涉及了热力学、流体力学、传热学、电化学、电网和电机等主题，并着重讨论了它们在发电、控制和调节等领域的应用。本书将帮助读者理解能源系统的建模方法以应用于控制器的设计，并掌握控制系统和调节器的基本设计过程。它也将对能源系统的动态仿真和监测系统的实现提供有益的指导。通过对可观测系统变量的量测来估计系统内部变量，从而实现对系统的监测。对于混合发电系统的设计者们而言，本书也将提供有效的帮助。本书介绍了混合发电系统中涉及的先进技术，例如浮动或近海风力机以及燃料电池等。本书通过真实案例分析介绍了基于非线性动态模型的各种发电系统的实际控制规则，在这些控制规则中并不需要对非线性动态模型进行线性化。同时，本书还向读者介绍了基于非线性模型的估计方法及其在能源系统中的应用。

本书适合从事新能源发电技术的工程技术人员阅读，也可供从事常规能源发电技术的工程技术人员和大专院校相关专业师生参考。

译者序

随着近代工业发展对传统化石燃料能源的开采和大量使用，环境恶化已成为全球共同关注的重大问题。此外，传统能源储量的急剧减少，也使得人类不断探寻新的出路。这种迫切需求推动着学术界和工业界积极探索，一方面尽可能提高传统能源的利用效率，另一方面加大对新能源的利用，优化能源结构。

本书从现代自动控制技术的角度出发，通过对发电系统，尤其是新能源发电系统中，能量产生和转化的动态过程进行有效建模，既便于利用现代估计方法对系统内部变量进行持续监测，又能以此为基础调节和控制发电过程，从而确保系统运行于最佳效率，将能源，特别是新能源以最优的方式向其可利用形式转化。

本书的作者 Ranjan Vepa 博士毕业于斯坦福大学，获应用力学博士学位，曾在 NASA Langley 研究中心工作，现就职于伦敦大学。Vepa 博士在动态建模和控制领域有 5 本著作，他的主要研究领域包括控制系统设计及相关信号处理在机械系统、能源系统、生物医学工程等方面的应用，尤其精通各类线性及非线性动态系统参数的自适应估计和动态控制，包括航天、能源和生物系统等。正是 Vepa 博士扎实的学术和工业背景，使得他既能从热力学、流体力学、传热学、电化学等的基础知识出发，从物理角度为读者详尽而系统地分析、介绍能源系统的基本原理，又能从实际应用角度，通过真实案例分析给读者以建议和指导。本书的主要特色在于：

1) 突出基本原理。在建模领域，人们常提“数学建模”，把系统看作一个黑盒，只关注建立输入与输出之间的数学模型，而忽视其内部运行机理。本书开篇即深入浅出地介绍了对于后续内容理解所必需的电机、流体力学、热力学以及传热学的基本知识。接着聚焦于这些原理在电力过程中的应用，涵盖所有电动机和发电机的基本原理和控制系统的关键要素。通过深入浅出的原理介绍，使得读者对各类能源系统，包括燃气轮机、风力机、燃料电池和电池等，都在基本原理层面有了深入、细致的了解。

2) 非线性动态模型真实案例分析。针对线性系统的研究已经非常成熟，相应的控制规则设定也更为简单。因此，哪怕实际系统为非线性系统，常规的做法往往是将其线性化，然后套用线性系统建模和控制方法。本书通过真实案例分析介绍了基于非线性动态模型的各种发电系统的实际控制规则，在这些控制规则中并不需要对非线性动态模型进行线性化。此外，本书还向读者介绍了基于非线性模型的估计方法及其在能源系统中的应用。

3) 内容全面、系统、实用。正如作者在原书前言中提到的那样，本书汇集了一系列关于发电系统的设计、调节和控制等不同主题。本书着重阐述了天然气发



电、风力发电、燃料电池等能源系统新兴领域的动态建模、仿真与控制方法，而这些建模和控制的原理同样适用于其他像太阳能、海浪能等非传统、非常规能源的开发利用。书中还介绍了混合发电系统所涉及的先进技术，例如浮动或近海风力机以及燃料电池等，将为混合发电系统的设计提供有益指导。本书的最后一章主要讨论了非常规发电方法。可以预见，本书的出版将对我国提高传统能源利用效率、优化能源结构以及加大新能源的利用具有重要的理论意义。

本书主要由3位译者合译完成，其中滕婧承担了原书前言和第1~3章的翻译工作，张莹承担了第4章和第5章的翻译工作，周蓉承担了第6~8章以及缩略语部分的翻译工作。周蓉和滕婧共同对全书的译文进行了必要的审校和润色。另外，吴梦华、杜婧、高雅弟、文丰、刘少文也参与了部分内容的翻译。

感谢翻译过程中家人的支持和理解以及朋友的帮助和指点。由于水平和时间所限，译者对原书中的知识和原作者的本意可能理解传达不够到位，若有不妥和错误之处，敬请读者指正。

周 蓉
2018年1月

原书前言

在过去的十年间，人们已经见证了全世界化石燃料资源的逐渐枯竭，这促使人们更加迫切要求提高电力生产及利用的效率，而且人们关注的重点逐渐转向风能、太阳能、水能等不会造成环境污染的可再生能源的利用。这种迫切需求促使了一系列基于自动控制技术的应用，以尽可能最优地将能源向其可利用形式转化。为了在能量生产过程中应用现代自动控制器设计技术，必须要对能量产生和转化的动态过程中最重要的环节进行有效的建模。而这种建模不仅方便了自动控制系统的设计，以用于调节能量的生产过程，而且有利于确保该系统运行于最佳效率。此外，它便于利用现代估计方法对相关系统变量进行持续监测。

本书涉及一系列关键问题，包括动态建模、仿真和某些能源系统的控制问题，例如燃气轮机、风力机、燃料电池和电池等。这些建模和控制的原理也同样适用于其他非常规发电方法，如太阳能和波浪能。本书的主要特点在于，它汇集了一系列关于发电系统的设计、调节和控制等不同主题。

本书帮助读者掌握能源系统的建模方法，以实现控制器的设计，并理解控制系统和调节器的基本设计过程。它也将对能源系统的动态仿真和监测系统的实现提供有益的指导，即通过对可观测系统变量的量测来估计系统内部变量，从而实现对系统的监测。

本书的一个核心特征是，它汇集了热力学、流体力学、传热学、电化学、电网和电机等主题，并着重讨论了它们在发电、控制和调节等领域的应用。它也将为混合发电系统的设计提供有效帮助，书中介绍了混合发电系统所涉及的先进技术，例如浮动或近海风力机以及燃料电池等。本书通过真实案例分析介绍了基于非线性动态模型的各种发电系统的实际控制规则，在这些控制规则中并不需要对非线性动态模型进行线性化。本书还向读者介绍了基于非线性模型的估计方法及其在能源系统中的应用。

本书的第1章介绍了对于理解后续第3~8章内容所必需的电机、流体力学、热力学以及传热的基本原理。第2章的主题是能量向可利用的电能形式转换的原理，第2章还涵盖了所有电动机和发电机的基本原理。此外，第2章还有一节关于电动机的扩展部分，这是控制系统的关键要素。第3章的重点是交流电机的动态特征，主要介绍感应和同步发电机的特性。第4章着重于风力发电，包括典型的水平轴线风力机的部件，风力发电的基本原理，风场的特性和范围，以及风轮、塔、浮子或支撑结构的动态特征。第5章涉及燃气轮机和压缩机的动态建模，包括燃烧



室、涡轮机、喷嘴和扩散器。第6章是关于燃料电池的电化模型，第7章介绍了高性能电池。最后一章主要讨论了非常规发电方法。

我要感谢我的同事，以及过去和现在那些在伦敦大学工程与材料科学学院的学生对我的支持。

我要感谢我的妻子 Sudha，感谢她的爱、她的理解和耐心。她的鼓励是激励我完成本书的主要动力。我还想感谢我们的孩子 Lullu、Satvi 和 Abhinav，感谢她们在本书撰写过程中对我的理解。

R. Vepa

缩 略 语

AC	Alternating Current	交流
BEM	Blade Element Momentum	叶素动量
CCM	Catalyst – Coated Membrane	催化剂涂层膜
CS	Control Surface	控制面
CV	Control Volume	控制容积
DC	Direct Current	直流
DFIG	Doubly Fed Induction Generator	双馈感应发电机
EMF	Electro Motive Force	电动势
EKF	Extended Kalman Filter	扩展卡尔曼滤波
EnKF	Ensemble Kalman Filter	集合卡尔曼滤波
FACTS	Flexible AC Transmission System	柔性交流输电系统
FADEC	Full Authority Digital Engine Controller	发动机全权限数字控制器
FC	Fuel Cell	燃料电池
GDL	Gas Diffusion Layer	气体扩散层
IGBT	Insulated – Gate Bipolar Transistor	绝缘栅双极型晶体管
JONSWAP	JOint North Sea WAve Project	北海联合海浪计划
KBM	Kinetic Battery Model	动力电池模型
KF	Kalman Filter	卡尔曼滤波
kVA	kiloVolt – Amperes	千伏安
kW	kiloWatt	千瓦
LPV	Linear Parameter Varying	线性参数变化
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	熔融碳酸盐燃料电池
MMF	Magneto Motive Force	磁动势
MPP	Maximum Power Point	最大功率点
MPPT	Maximum Power Point Tracking	最大功率点跟踪
MVA	MegaVolt – Amperes	兆伏安
MW	MegaWatt	兆瓦
NACA	National Advisory Committee on Aeronautics	美国国家航空咨询委员会
NARMAX	Nonlinear AutoRegressive Moving Average Models With eXogenous Inputs	非线性自回归滑动平均模型
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	磷酸燃料电池
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell	质子交换膜燃料电池
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator	永磁同步发电机
PV	Photo Voltaic	光伏
RC	Resistive Capacitive	阻容



SHE	Standard Hydrogen Electrode	标准氢电极
SOC	State Of Charge	荷电状态
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	固体氧化物燃料电池
STATCOM	STATIC Synchronous COMPensators	静止同步补偿器
SVC	Static Var Compensator	静止无功补偿器
UKF	Unscented Kalman Filter	无迹卡尔曼滤波

目 录

译者序

原书前言

缩略语

第 1 章 发电基本原理介绍	1
1.1 流体力学	1
1.1.1 质量、动量和能量守恒	1
1.1.2 应力应变率和黏度的关系	3
1.1.3 理想气体和声波	4
1.1.4 参考状态	6
1.1.5 正则冲击波关系式	7
1.1.6 一维流动：Rayleigh 流	8
1.1.7 一维流动：Fanno 流	13
1.1.8 准一维流	15
1.1.9 倾斜冲击波	18
1.1.10 Prandtl – Meyer 流	20
1.2 热力学	22
1.2.1 热力学第零定律	24
1.2.2 热力学第一定律	24
1.2.3 热力学第二和第三定律	24
1.2.4 在实际气体中做功所需的热量	25
1.2.5 自发过程和热力学势	25
1.2.6 可逆性、能量和循环	27
1.2.7 第二定律的应用	28
1.2.8 基本发电循环	29
1.2.9 热传递：传导、辐射、对流热传递	30
1.3 电化学：简介	33
1.3.1 燃料电池热力学	34
1.3.2 电极电化学	35



1.3.3	Gibbs 势能变化	37
1.3.4	燃料电池效率	38
1.3.5	电极超电位	38
1.3.6	半电池电极示例	40
1.3.7	盐桥	40
1.3.8	电极和电池的类型	41
1.3.9	蓄电池和燃料电池示例	41
参考文献		44
第2章 能量转换原理		45
2.1	发电机和电动机的初步概念	45
2.1.1	简介	45
2.1.2	发电机和电动机的基本运行原理	45
2.2	电机：直流电动机	46
2.2.1	直流电动机的负荷	49
2.2.2	直流电动机的分类	49
2.3	交流电动机	50
2.3.1	同步电动机	50
2.3.2	同步电动机的分类	50
2.3.3	同步电动机的运转	50
2.3.4	同步电动机的负荷	52
2.3.5	感应电动机	54
2.3.6	交流伺服电动机	55
2.3.7	交流转速计	57
2.4	无刷直流电动机	57
2.5	步进式直流电动机	59
2.6	高性能电动制动器的设计与开发	60
2.7	驱动直流电动机：直流电动机的速度控制	60
2.7.1	控制直流电动机：位置控制伺服	60
2.8	驱动和控制交流电动机	66
2.9	电动伺服制动器的稳定性	68
2.9.1	劳斯表法	71
2.10	发电机	71
2.10.1	同步交流发电机	72
2.10.2	同步交流发电机的动态建模	72
2.10.3	感应交流发电机	75



2.11 电力系统	77
2.11.1 电力系统稳定性	77
2.11.2 输电线路	79
2.11.3 变压器	82
2.11.4 功率因数提升	83
参考文献	84
第3章 同步和感应发电机的建模	85
3.1 建模的通用原理: Park 变换和应用	85
3.2 励磁同步发电机	89
3.3 等效电路模型	90
3.4 具有磁场定向的永磁同步发电机的机电模型	90
3.5 励磁同步发电机的应用	93
3.5.1 典型励磁器的建模	95
3.5.2 模型参数的计算	96
3.6 同步发电机的性能特性	97
3.7 感应发电机的动态建模	98
3.7.1 等效电路建模	99
3.7.2 感应发电机模型的参数计算	100
3.7.3 感应发电机特性以及参数的实验测定	101
3.8 DFIG: 实例分析	101
3.8.1 稳态机电模型	104
3.8.2 非线性扰动动力学	105
参考文献	107
第4章 风力发电和控制	108
4.1 简介	108
4.2 风力机组件	108
4.3 风力机空气动力学: 动量理论	108
4.3.1 致动器盘原理	109
4.3.2 贝兹极限	110
4.3.3 流旋转的影响	111
4.4 叶素动量理论	112
4.4.1 功率因数: BEM 理论表达式	114
4.5 叶片的气动设计	115
4.6 叶片结构动力学	117



4.7	风轮空气弹性变形的动态建模	126
4.7.1	多叶片坐标系	128
4.7.2	多叶片坐标系里的运动方程	129
4.7.3	扭转模式的离心固化	130
4.7.4	基于叶素理论的空气动力力矩	131
4.7.5	流入动力学	133
4.7.6	驱动流入中心的力矩	133
4.7.7	风轮转矩系数：一般表达式	136
4.7.8	风轮转矩系数：在不断流入和有稳定根间距的 刚性叶片的情况下	137
4.8	实际的功率因数和它依靠在叶片安装上的角度	138
4.9	最大功率点跟踪和防止过度风转矩	140
4.10	柔性风轮叶片上的准稳定气动负载	143
4.11	弹性风轮叶片的动力学和气动力弹性学	146
4.12	风场速度分布和谱	148
4.13	支撑结构	150
4.13.1	塔动力学和气动伺服弹性	150
4.13.2	海上和浮动支撑结构	151
4.13.3	水动力和水下冰荷载	152
4.13.4	浮体动力学及波流体动力学	156
4.13.5	浮子-风轮被动及主动解耦控制	158
	参考文献	159
第5章	燃气轮机和压缩机的动态模型	163
5.1	燃气轮机：典型组成和动态模型	163
5.2	轴流压缩机系统：一维管道模型	168
5.2.1	激盘理论	168
5.3	Moore-Greitzer 模型	168
5.3.1	压缩机喘振和旋转失速	169
5.3.2	Moore-Greitzer 模型方程式的推导	172
5.3.3	Moore-Greitzer 模型方程	174
5.3.4	稳定流分析	176
5.3.5	不稳定非线性扩展 Moore-Greitzer 模型	177
5.3.6	旋转失速振动应用	179
5.3.7	模型响应和不稳定性	180
5.3.8	节流阀调整的控制规则	184



5.3.9	旋转失速振动强度控制	184
5.3.10	控制均衡的稳定性	185
5.3.11	压缩旋转失速控制	188
5.4	燃烧	188
5.4.1	燃烧室	189
5.4.2	燃烧室空气声学	190
5.4.3	流量耦合热声不稳定: POGO、嗡鸣、功率振荡和啸叫	193
5.5	整体喷气发动机体积动力学建模	194
5.5.1	压缩机模型	196
5.5.2	燃烧室子系统模型	199
5.5.3	涡轮动力学模型	200
5.5.4	涡轮动力和转矩输出	203
5.5.5	一维可变面积导管: 后燃器和喷嘴	203
5.5.6	线轴动力学模拟	205
5.5.7	典型模拟结果	205
5.6	FADEC	205
	参考文献	206
 第6章 燃料电池的建模与仿真		209
6.1	燃料电池系统	209
6.2	燃料电池的热力学和电化学	211
6.2.1	燃料电池的热力学	211
6.2.2	燃料电池的电化学反应和电催化作用	212
6.3	氢气的产生、存储与扩散	213
6.4	燃料电池堆的配置和燃料电池系统	214
6.5	面向控制的建模和动力学	215
6.6	PEMFC 的降阶模型	216
6.6.1	PEMFC 模型	218
6.6.2	膜湿度模型	219
6.6.3	燃料电池输出电极的极化	221
6.7	PEMFC 的流基模型	223
6.7.1	PEMFC 中的动态流建模	223
6.7.2	电池的输出方程	229
6.8	SOFC	231
6.9	SOFC 的热电联产应用	237
6.10	燃料电池仿真	238



6.11	估计燃料电池的参数	239
6.12	燃料电池控制器的设计	241
	参考文献	245
第7章 电池：建模和充电状态估计		250
7.1	简介	250
7.2	电池电化学	250
7.3	容量和荷电状态	251
7.3.1	Peukert 方程	252
7.3.2	性能曲线	253
7.4	电池建模	253
7.5	SOC 估计	259
7.6	系统和参数辨识	259
7.7	KF 和 EKF	261
7.7.1	UKF	263
7.7.2	自适应 KF	265
7.7.3	基于自适应 UKF 的参数辨识	266
	参考文献	267
第8章 非常规能源发电：太阳能发电、波浪能发电和潮汐能发电		269
8.1	简介	269
8.2	太阳电池：特性简介	270
8.2.1	类型和特点	271
8.2.2	光敏器件：操作原理	272
8.2.3	太阳电池输出功率模型	277
8.2.4	MPPT 控制	280
8.3	波浪能发电	281
8.3.1	波浪能发电转换装置	283
8.3.2	浮体波电位	283
8.3.3	最佳动力输出条件	284
8.3.4	Wells 涡轮机	285
8.4	潮汐能	286
	参考文献	287

第1章

发电基本原理介绍

1.1 流体力学

在着手对能源系统建模的具体研究之前，本章将着重讨论流体力学和热力学的基本原理，以及与能源系统相关的气体动力学基本原理。针对这些内容更详细的论述参见 White (2003)、Liepmann 和 Roshko (2002) 以及 Babu (2008) 的研究。

1.1.1 质量、动量和能量守恒

一种便捷且统一的流控制方程表达形式是采用一个通用变量 Φ 表示传输标量或者向量值，它与某一预定流体 [通常被称为控制容积 (Control Volume, CV)] 的质量相关联。设某一特定流体值 Φ 的单位质量为 ϕ ，材料密度为 ρ ，则使用体积的无穷小元素 $d\mathbf{x}$ 可建立 Φ 和 ρ 之间的基本积分关系如下所示：

$$\Phi = \int_{CV} \rho \phi d\mathbf{x}$$

如果 $\mathbf{u}$ 表示 CV 中流体的速度矢量， $\mathbf{n}$ 表示包围 CV 的控制面 (Control Surface, CS) 上定义的向外绘制的单位法线，则变量 Φ 的时间变化率为

$$\frac{d\Phi}{dt} = \int_{CV} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} d\mathbf{x} + \int_{CS} \rho\phi(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) ds \quad (1.1.1)$$

式中， $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}$ 是矢量 $\mathbf{u}$ 和 $\mathbf{n}$ 的点积。

从式 (1.1.1) 中可看出， Φ 的变化速率为两个部分之和：其一是整个控制容积的流体 ϕ 的变化率；其二是通过边界表面的流体 ϕ 的净流出量。通用变量 Φ 通常可以表示总质量，在这种情况下， $\phi = 1$ ； Φ 也可以表示动量，在这种情况下， ϕ 对应矢量 $\mathbf{u}$ ；或者 Φ 还可以是总能量，在这种情况下， ϕ 对应特定能量值 e 。

考虑到 CV 内总质量的时间变化率，式 (1.1.1) 所表达的流体变量传动方程可一般化为

$$\frac{d\Phi_m}{dt} = \int_{CV} \frac{\partial\rho}{\partial t} d\mathbf{x} + \int_{CS} \rho(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) ds = 0 \quad (1.1.2)$$

式 (1.1.2) 表示质量守恒原理。尤其在式 (1.1.2) 中，可以调用高斯散度