



清华大学学术专著

大型火电机组系统 仿真与建模

吕崇德 任挺进 姜学智 程芳真 著



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

大型火电机组系统 仿真与建模

吕崇德 任挺进 著
姜学智 程芳真

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

计算机仿真技术是涉及到多种专业的交叉学科,大型电站仿真技术涉及到计算机技术、热能动力、电机与电气、自动控制等多个学科领域。电站机组仿真系统既可用于对运行人员进行培训,也可作为工程设计、工程调试和工程分析之用。

本书内容大多是清华大学热能工程系大型火电仿真系统科研集体和清华能源仿真公司 20 多年来部分科技成果的积累,通过本书加以编撰和系统化。书中扼要介绍了大型火电仿真系统的仿真对象、仿真机功能与评价;包括计算机系统、机组控制操作盘台和工作站、I/O 接口等在内的硬件设备组成;仿真建模与调试支持环境、仿真图形界面等软件;电站锅炉、汽轮机、发动机和自动控制等设备和系统的建模理论和建模方法等。

本书可供电力部门和各种连续流程工业部门的科研、设计、生产人员使用,也可作为热能动力专业、石油化工专业、自动控制专业和计算机专业硕士生、博士生的教学参考书。

书 名:大型火电机组系统仿真与建模

作 者:吕崇德 任挺进 姜学智 程芳真 著

出 版 者:清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

责任编辑:金文织

印 刷 者:清华大学印刷厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:22.75 插页:1 字数:381 千字

版 次:2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-05385-5/TK·26

印 数:0001~2000

定 价:63.00 元

ABSTRACT

Computer simulation technology is a new multi-disciplinary area. Simulation technology for modern power plant involves many advanced topics, such as computer science, thermal energy and power generation, electrical machinery and systems, and automatic control. The simulation system for the power generation unit in a power plant can be utilized in personnel and operation training, as well as in engineering design, testing, and analysis.

Majority of the content in this book is accumulated from scientific research through more than twenty years of development by the Department of Thermal Engineering of Tsinghua University and Tsinghua Energy Simulation Co. This book is to compile and systematically present such knowledge and research to the readers. Subjects such as the simulation target for the modern fossil-fuel power plant in addition to the functionality and evaluation of the simulators are briefly introduced. The hardware and equipment of the system, which consists of the computer systems, control and operation platforms and I/O interfaces are discussed. Software about simulation modeling and debugging support environment, as well as simulation graphic interface, is also included. Other topics such as modeling theory and methodology about boilers, steam turbines, power generators and automatic control equipment can also be found in this book.

This book is for scientists and engineers in the areas of research, design and manufacturing for electrical utility companies, and other similar industries. It can also be used as reference book for graduate students who are majoring in the field of thermal engineering, power generation, petroleum and chemical engineering, automatic control and computer science.

3A 90105

前 言

计算机仿真是一门新兴的交叉学科,并已和军事、工业、农业、教育、生活等领域密切结合,形成各具特色的仿真技术。在电力工业中仿真技术较早、较快地得到发展与应用。本书作者所在的科研集体 20 世纪 70 年代率先在国内开展了大型火电仿真培训系统的研究,成功地研制出我国首台电站仿真培训系统,使中国成为世界上有能力开发电站仿真培训机的少数几个先进国家之一,并荣获国家科学技术进步一等奖、电力部优秀科技成果一等奖。在此科研成果的基础上,为将其转化为生产力,成立了北京清华能源仿真公司,到 1997 年已为国内和国外电力部门制成了 20 多台仿真培训机,并将大型电站仿真软件和建模技术出口韩国。其中部分成果还获得 1992 年全国十大科技成就奖、国家“八五”科技攻关重大科技成果奖。此外,清华大学的电厂仿真技术和成果得到国际权威学术机构——国际计算机仿真学会的肯定和高度评价,本书主编吕崇德教授于 1995 年被授予“突出贡献奖”。

作者所在的科研集体从事电站仿真科学研究、学科建设和技术开发等工作达 20 余年,使用过多种仿真计算机系统;研制、生产和使用过多种 I/O 接口系统;开发出流程工业仿真支持环境软件平台;在热力过程及其控制系统的建模理论和建模方法等方面均进行过比较深入的研究并取得成果;建立了电力系统及大型发电设备安全与仿真国家重点实验室发电厂仿真分室;培养了一批博士和硕士研究生,并为研究生开设出热工动态学课程等。与此同时,发表了大量学术论文,积累了一批技术资料。其中部分成果由本书编著者加以编撰,从不同的角度将成果反映在本书中。仿真的核心技术是建模,没有精确的数学模型就谈不上高精度的仿真技术。因此建模理论和建模技术在本书中占据了较大的篇幅。

本书共 3 篇,16 章。其中第一篇由吕崇德教授编写;第二篇中第 6 至


12章由任挺进博士编写,第13章由姜学智教授编写;第三篇由程芳真博士编写。全书由吕崇德任主编。

本书的读者对象是从事热能动力工程及其自动控制的研究、设计、运行调试和教学等工作的专业人员。本书也可以作为研究生和大学生的教材或参考书。此外,对在石油、化工等流程工业中从事仿真工作的科技人员同样具有参考价值。

由于每位编著者在仿真技术中只从事一个侧面的工作,水平有限,因此书中出现内容和文字上的错误和缺点在所难免,敬请读者指正。

作 者

2000年12月于清华园



主编简介



吕崇德，1934年生，山东省青岛市人，1957年毕业于清华大学动力系。现为清华大学热能系教授、博士生导师。主要学术方向为电站系统仿真、热工测量及自动控制。于20世纪70年代率先在国内从事电站系统仿真研究，领导完成我国首台大型火电仿真系统，并成立清华能源仿真公司，为国内外完成了一大批电站仿真系统。获1985年国家科技进步一等奖，获1992年国家十大科技成就奖，“八五”重大项目科技攻关一等奖。1995年获国际计算机仿真学会颁发的“突出贡献奖”，1997年获全国五一劳动奖章。编著有《热工参数测量与处理》，发表学术论文50余篇。

目 录

第一篇 电站系统仿真技术

第 1 章 系统仿真概述	2
1.1 系统仿真的重要性	2
1.2 系统仿真的应用	3
1.3 系统仿真和仿真系统	6
1.4 仿真系统的分类	8
1.5 火电培训仿真机的专用分类方法.....	10
1.6 系统仿真中技术术语的内涵.....	10
第 2 章 大型发电厂仿真技术的发展过程	13
2.1 电厂仿真技术的重要性和必然性.....	13
2.2 电厂仿真技术的发展历程.....	15
第 3 章 发电厂生产过程的仿真原则	32
3.1 概述.....	32
3.2 锅炉设备主要系统及仿真原则.....	34
3.3 蒸汽轮机主要系统及仿真原则.....	43
3.4 发电机和电气系统及仿真原则.....	49
3.5 火电机组的运行与仿真机的调试.....	51
3.6 火电厂的自动控制及仿真要求.....	55
第 4 章 电站培训仿真机工作原理及功能要求	67
4.1 仿真机的工作原理.....	67
4.2 对仿真机的功能要求.....	70
4.3 仿真机的精度.....	75

第 5 章 仿真机的硬件系统结构	78
5.1 仿真机的操作控制盘台	78
5.2 主计算机系统	83
5.3 I/O 接口系统	85
5.4 就地操作站、指导教师工作站和工程师站	93

第二篇 建模原理与技术

第 6 章 电站实时仿真模型概述	98
6.1 建立电站实时仿真模型的理论基础	98
6.2 动态数学模型的作用与类型	102
6.3 动态数学模型的不同表示形式	105
6.4 建立动态数学模型的一般步骤	111
第 7 章 仿真对象基本动态数学模型	114
7.1 一元非定常流动的基本方程	114
7.2 基本方程的扩展形式	117
7.3 集总参数形式的基本方程	122
7.4 传热方程	130
7.5 流体介质的热力性质	135
第 8 章 锅炉系统数学模型	138
8.1 锅炉蒸发系统数学模型	138
8.2 锅炉对流受热面各环节的数学模型	145
8.3 制粉及风烟系统数学模型	150
8.4 锅炉燃烧及传热数学模型	158
第 9 章 汽轮机系统数学模型	161
9.1 汽轮机的流量、功率计算数学模型	161
9.2 旁路系统数学模型	163
9.3 液压调节系统及油系统数学模型	165
9.4 凝汽系统数学模型	171
9.5 除氧器、回热加热器数学模型	179
9.6 振动与轴向位移数学模型	187
9.7 汽轮机缸体温度、胀差数学模型	188

第 10 章	模块化建模及流体网络的计算方法	193
10.1	模块化建模方法	193
10.2	热工流体网络建模方法	202
第 11 章	仿真数学模型的求解与算法	208
11.1	整体数学模型的构成	208
11.2	模型的数学结构	209
11.3	仿真模型的求解	212
11.4	常微分方程组求解的算法选择	214
11.5	代数方程组的联立求解	221
第 12 章	电气系统数学模型	223
12.1	发电机数学模型	223
12.2	励磁系统数学模型	234
12.3	同期系统数学模型	238
第 13 章	电站控制系统仿真	240
13.1	概述	240
13.2	控制系统建模方法与建模系统	243
13.3	控制系统全仿真模型分析	264
13.4	控制系统仿真模型调试与参数自整定	282

第三篇 仿真支撑环境与仿真机的调试

第 14 章	仿真支撑环境的定义、作用及其发展概况	302
14.1	什么是仿真支撑环境	302
14.2	仿真支撑环境的作用	303
14.3	仿真支撑环境的起源与发展	305
第 15 章	仿真支撑环境的功能构成	308
15.1	自动建模	308
15.2	模型调试与结果分析	309
15.3	运行支撑	309
第 16 章	微机系统电站仿真支撑环境	312
16.1	系统简介	312
16.2	数据结构及内存共享	314

16.3	调试系统	317
16.4	变量数据库管理系统	332
16.5	主程序库	334
16.6	网络通信系统	335
参考文献		344

Contents

Part 1 System Simulation Technologies for Power Plant

Chapter 1 Introduction of System Simulation	2
1.1 Importance of System Simulation	2
1.2 Application of System Simulation	3
1.3 System Simulation and Simulation System	6
1.4 Classification of Simulation System	8
1.5 Special Classification for Power Plant Training Simulators	10
1.6 Connotation of Terminology in System Simulation	10
Chapter 2 Developing Process of Simulation Technologies in Modern Power Plant	13
2.1 Importance and Necessity of Simulation Technologies in Modern Power Plant	13
2.2 Developing Process of Simulation Technologies in Modern Power Plant	15
Chapter 3 Simulation Principle of Electric Power Process	32
3.1 Introduction	32
3.2 Main Systems of Boiler and Simulation Principle	34
3.3 Main Systems of Steam Turbine and Simulation Principle	43
3.4 Generator and Electrical Equipments and Simulation Principle	49
3.5 Operation of Thermal Equipments in Fossil Power	

Plant and Test of Simulator	51
3.6 Automatic Control System in Fossil Power Plant and Simulation Principle	55
Chapter 4 Operation Principle and Function Requirements of Training Simulators for Power Plant	67
4.1 Operation Principle of Simulator	67
4.2 Function Requirements of Simulator	70
4.3 Fidelity of Simulator	75
Chapter 5 Hardware Components of Simulator	78
5.1 Control and Operation Panels of Simulator	78
5.2 Host Computer System	83
5.3 I/O Interfaces System	85
5.4 Local Operation Station, Instruction Station and Engineer Station	93
Part 2 Principle and Technology of Modeling	
Chapter 6 Introduction of Real-time Simulation Model of Power Plant	98
6.1 Fundamental Theory of Building Real-time Simulation Model of Power Plant	98
6.2 Using and Type of Dynamic Mathematic Model	102
6.3 Different Expressive Format of Dynamic Mathematic Model	105
6.4 General Steps for Building Dynamic Mathematic Model	111
Chapter 7 Basic Dynamic Mathematic Model of Simulation Object	114
7.1 Fundamental Equation of One-dimensional Non-equilibrium Flow	114
7.2 Extended Style of Fundamental Equation	117
7.3 Fundamental Equation in Lumped Parameter Form	122
7.4 Heat Transfer Equation	130

7.5	Heat Properties of Flow Medium	135
Chapter 8	Mathematic Model of Boiler System	138
8.1	Mathematic Model of Evaporation System of Boiler	138
8.2	Mathematic Model of Each Convective Heated Surface	145
8.3	Mathematic Model of Coal Pulverization and Air Flue System	150
8.4	Mathematic Model of Combustion and Heat Transfer in Furnace	158
Chapter 9	Mathematic Model of Steam Turbine System	161
9.1	Flux and Power Calculation Model of Steam Turbine	161
9.2	Model of By-pass System	163
9.3	Mathematic Model of Hydraulic Control and Oil System	165
9.4	Mathematic Model of Condensed Steam System	171
9.5	Mathematic Model of Back-Heating Heater and Deaerator	179
9.6	Mathematic Model of Vibration and Axial Displacement	187
9.7	Mathematic Model of Temperature and Expanding Difference of Steam Turbine Cylinder	188
Chapter 10	Computation Method of Modularization Modeling and Fluid Network	193
10.1	Modularization Modeling Method	193
10.2	Modeling Method of Thermal Engineering Fluid Network	202
Chapter 11	Solution and Algorithm of Simulation Mathematic Model	208
11.1	Structure of Whole Mathematic Model	208
11.2	Mathematical Structure of Model	209
11.3	Solution of Simulation Mathematic Model	212
11.4	Algorithm Selection of Ordinary Difference	

Equation Solution	214
11.5 Simultaneous Solution of Algebraic Equation Group	221
Chapter 12 Mathematic Model of Electric System	223
12.1 Mathematic Model of Generator	223
12.2 Mathematic Model of Excitation System	234
12.3 Mathematic Model of Corresponding Period System	238
Chapter 13 Simulation of Power Station Automatic Control System	240
13.1 Introduction	240
13.2 Modeling Method and Modeling System of Automatic Control System	243
13.3 Full Scale Simulation Model Analysis of Automatic Control System	264
13.4 Debugging of Simulation Model of Control System and Parameter Self-tuning of Controller	282
 Part 3 Simulation Support Environment and Debugging of Simulator 	
Chapter 14 Definition, Function and General Development Situation of Simulation Support Environment	302
14.1 What is Simulation Support Environment	302
14.2 What does Simulation Support Environment Do	303
14.3 Origin and Development of Simulation Support Environment	305
Chapter 15 Function and Structure of Simulation Support Environment	308
15.1 Automatic Modeling	308
15.2 Model Debugging and Result Analyzing	309
15.3 Running Support	309

Chapter 16	Simulation Support Environment of Power Plant	
	Based on Personal Computer System	312
16.1	Introduction of System	312
16.2	Data Structure and Memory Sharing	314
16.3	Debugging System	317
16.4	Variable Database Management System	332
16.5	Main Program Library	334
16.6	Network Communication System	335
References	344

第一篇

电站系统仿真技术