

中国科学院科学出版基金资助出版

热动力系统建模与控制的若干问题

倪维斗 徐向东

李政 任挺进



科学出版社

1996

内 容 简 介

热动力系统由于效率、环保与安全的要求而日趋复杂,其动态特性、仿真与控制已成为从事动力工程的专家、学者和工程技术人员所关注的热点问题,并且目前它正在形成一门新的交叉学科。

本书是近十多年来作者科研成果的系统总结,其内容涵盖了热动力系统(蒸汽轮机、燃气轮机系统、循环流化床锅炉、联合循环、超高增压发动机系统等)的建模、辨识、控制与仿真的各个方面,其中包括荣获国家教委一等奖、二等奖及其它部委奖的重要成果。

由于作者所做的工作都是国家攻关、自然科学基金以及企业单位委托的课题中提炼出来的理论课题,因此书中所提出的新观点、新理论和新方法不仅对热动力系统,而且对其它领域均有启发性,本书理论与实际结合紧密,附有较多实例,便于读者应用。

本书可供企业、研究所和高等院校从事热动力系统科研、教学的人员参考,也可作为热能动力专业、自动化专业以及与能量转换有关专业的高年级学生、硕士生、博士生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

热动力系统建模与控制的若干问题/倪维斗著. -北京:科学出版社, 1996.10

ISBN 7-03 005336 2/TK·23

I. 热… I. 倪… II. ①热力系统;动力系统-热动力模型-建立模型-研究
②热力系统;动力系统-控制;研究 W. TK284.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 12738 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1996 年 10 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16
1996 年 10 月第一次印刷 印张: 126
印数: 1 1 000 字数: 597 000

定 价: 46.00 元

前 言

热动力系统动力学已形成一门新的交叉学科,要在这方面进行深入研究,一方面需对热动力机械与设备的物理化学过程有深入的理解与感受,另一方面又要较全面地掌握自动控制领域的新理论与方法,本书正是这两方面的相互融合与渗透的体现。

作者所领导的科研组是国内开展这方面研究的最早单位之一,经过多年的积累,通过“七五”、“八五”攻关,国家自然科学基金资助,与很多企业部门的横向协作以及近一年多来国家攀登B“现代电能系统运行与控制的新理论与新技术”课题的支持,取得了一定的成果,这些成果曾获国家教委科技进步一等奖和二等奖及石化总公司科技进步二等奖,在科技期刊上发表了近50余篇论文以及十几篇硕士和博士论文,这些论文是本书取材的主要来源。由于本书所提出的一些新思路和新方法是从实际问题中提炼出来的,因此不仅能用于热动力系统,还能用于其它领域。

本书在三年前就筹备出版,在此期间补充了一些新的研究成果,如循环流化床建模、汽轮机转子“复频法”建模等,作者谨以此书感谢长期以来对我们的工作给予支持和领导的领导和同行。

本书第四章、第八章和部分第九章由徐向东教授撰写,第五章和部分第七章由李政副教授撰写,第六章由任挺进副教授撰写,其余部分由倪维斗教授撰写并最后统稿,第十章采用了黄仙博士的材料,其他博士生(路四清博士、刘少英博士、潘永泉博士、李旭博士、王中泽博士、罗伟硕士)以及吕泽华副教授的论文亦在本书中有所反映,本书还引用了一些由作者和徐基豫教授主编的《自动调节原理与透平机械自动调节》一书的部分内容。

本书的读者对象是从事热动力系统动态分析与控制的技术人员、热动力工程专业研究生和高年级学生。

由于作者水平有限,时间也比较仓促,无论从内容上还是文字上错误都在所难免,敬请读者指正。

倪维斗

1996.4.15 于清华园

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 数学模型与仿真是 21 世纪的关键技术之一	1
1.2 热力系统动力学将成为一门新兴学科	2
1.2.1 技术发展提出的要求	2
1.2.2 热力系统动力学是学科的交叉	4
1.2.3 热力系统动力学的主要内容	4
1.3 有关建模复杂性的考虑	7
1.3.1 建模的层位问题	7
1.3.2 简单→复杂→简单	8
1.4 本书主要内容	10
第二章 热力系统的数学模型	12
2.1 几类简化系统的状态空间数学模型	12
2.1.1 热力系统	12
2.1.2 气动系统	14
2.1.3 液压系统	16
2.1.4 机械系统	20
2.1.5 机电系统	21
2.2 组合系统的状态空间表达式与热动力系统及其调节器的表达式	22
2.2.1 组合系统的状态空间表达式	22
2.2.2 热动力系统及其调节器的表达式	24
2.3 多变量系统与传递矩阵	27
2.3.1 多变量机械系统	27
2.3.2 多变量热力系统	28
2.3.3 多变量压缩机系统	29
2.4 用于分析燃气轮机动态特性的回热器方程	30
2.4.1 基本假定	30
2.4.2 沿回热器行程温度按线性分布时的微分方程组	31
2.4.3 用两段折线来近似温度分布计算模型	33
2.4.4 作为分布参数的对象来处理的计算模型	35
2.4.5 工程近似	37
2.4.6 小结与实例	38
2.5 燃气轮机的气道不稳定热交换动态方程	39
2.5.1 引言	39
2.5.2 微分方程的建立	40
2.5.3 两个考虑的比较和简化方法	44

2.6 蒸汽轮机的数学模型	45
2.6.1 发电用凝汽式蒸汽轮机的数学模型及其动态分析	45
2.6.2 中间再热式汽轮发电机组的数学模型和动态分析	53
2.7 单轴燃气轮机的数学模型	56
2.7.1 各部件的特性曲线及单轴燃气轮机整体特性	57
2.7.2 单轴燃气轮机的动态数学模型	63
2.8 分轴燃气轮机的数学模型与动态分析	70
2.8.1 分轴燃气轮机的静态特性分析	70
2.8.2 分轴燃气轮机的状态空间数学模型	72
2.8.3 分轴燃气轮机的动态分析	76
第三章 数学模型的简化	80
3.1 简化的目的	80
3.2 模态分析和模型简化	80
3.3 实例分析——航机舰用燃气轮机推进系统的模型简化	83
3.3.1 系统的数学模型	83
3.3.2 系统的模态分析与灵敏度分析	84
3.4 分析燃气轮机动态特性的“主导因素法”	87
3.4.1 引言	87
3.4.2 方法提出的思路	87
3.4.3 用“主导因素法”简化模型的步骤及应用范围	90
第四章 非线性与非稳态的处理	92
4.1 大扰动问题的提出	92
4.1.1 一般的线性化问题	92
4.1.2 大扰动的特殊情况	94
4.2 以非稳态工况为起点的分段线性化方法	95
4.2.1 三轴燃气轮机的状态空间数学模型	95
4.2.2 计算方法	109
4.2.3 计算结果与小结	101
第五章 分布参数系统的处理	103
5.1 引言	103
5.2 长输气管线动态特性的解析分析及其工程应用	103
5.2.1 管道中气体运动偏微分方程的建立	104
5.2.2 用分离变量法解定解问题	105
5.2.3 工程简化	109
5.2.4 传递函数及按过渡过程的拟合	113
5.2.5 几点讨论	118
5.3 管式换热器数学模型的简化及解析求解方法	122
5.3.1 管式换热器数学模型	122
5.3.2 单相受热管的传递函数简化方法	123
5.3.3 针对沸腾床埋管分布参数模型简化的积分平均法	127
5.3.4 常压沸腾炉空气埋管动态计算的一种解析方法	135

5.3.5	管式换热器动态特性计算的半解析解方法	139
5.3.6	双流管式换热器的数值-解析混合仿真方法	145
5.4	本章小结	150
第六章	模块化建模	152
6.1	为什么要模块化建模	152
6.2	大系统的模块化分解	153
6.3	模块的数学模型	156
6.3.1	有关阻力和流量之间的关系	156
6.3.2	转子部件数学模型	157
6.3.3	换热器部件数学模型	161
6.3.4	管道部件数学模型	165
6.3.5	催化剂再生器部件数学模型	166
6.3.6	锅炉炉膛及汽包蒸发系统数学模型	167
6.3.7	阀门部件数学模型	171
6.4	子模型的综合与求解	173
6.4.1	模块模型的数据结构	173
6.4.2	系统结构矩阵	174
6.4.3	数据通讯模型	175
6.4.4	控制对象线性模型综合与求解	176
6.4.5	控制对象非线性模型综合与求解	186
6.5	实例分析	191
6.5.1	燃气-蒸汽联合循环系统动态特性仿真结果及分析	191
6.5.2	注蒸汽燃气轮机系统动态特性分析	196
第七章	两种特殊动力设备的数学模型	201
7.1	循环流化床锅炉数学模型	201
7.1.1	引言	201
7.1.2	流化床锅炉的数学模型与仿真	202
7.1.3	清华大学循环流化床数学模型	203
7.1.4	循环流化床锅炉燃烧系统子模型	211
7.1.5	燃烧系统数学模型的求解	228
7.1.6	几种运行情况的仿真及分析	229
7.2	超高增压发动机系统的数学模型和动、静态特性分析	239
7.2.1	引言	239
7.2.2	超高增压发动机系统数学模型的建立	240
7.2.3	数学模型的静态校核	244
7.2.4	超高增压发动机系统的动态性能仿真	251
第八章	用伪随机信号对热动力系统的辨识	259
8.1	系统的脉冲响应	259
8.2	自相关函数与互相关函数	260
8.2.1	自相关函数与互相关函数的定义	260
8.2.2	利用试验信号识别系统	262

8.3	用伪随机二进制信号辨识系统	263
8.4	功率谱与功率谱密度函数	265
8.5	由频率特性拟合传递函数的 Levy 方法	268
8.6	实例分析	270
8.6.1	单轴燃气轮机的辨识	270
8.6.2	车用分轴燃气轮机的辨识	278
8.6.3	关于闭环辨识	286
第九章	热力系统的控制	289
9.1	热力系统的状态反馈——当量与反当量环节	289
9.1.1	概述	289
9.1.2	回热器的当量环节与反当量环节	290
9.1.3	气道热交换对系统动态的影响	292
9.1.4	回热器影响的校正	295
9.1.5	分轴燃气轮机的状态反馈	297
9.2	热力系统的解耦控制	300
9.2.1	热力系统的状态方程与传递函数	300
9.2.2	用频域法中的准优势法设计解耦器	301
9.2.3	实例分析——有可调喷嘴分轴燃气轮机的解耦控制	304
9.3	单元抽汽供热机组的协调控制	310
9.3.1	概述	310
9.3.2	单元机组及单元抽汽供热机组的协调控制的基本原理	311
9.3.3	单元供热机组运行特点与控制方法的选用	315
9.3.4	单元抽汽供热机组的动态数学模型	316
9.3.5	单元抽汽供热机组的协调控制设计方法	318
9.3.6	带时延环节抽汽机组协调控制系统的设计	323
9.4	发动机最小加速时间控制	327
9.4.1	最小时间加速燃油控制规律的设计	327
9.4.2	加速控制系统的参数整定	331
9.4.3	加速控制规律的混合仿真	333
9.5	超高增压柴油机系统的控制	336
9.5.1	普通柴油机的控制	336
9.5.2	超高增压发动机的控制特点	337
9.5.3	一个控制方案	339
9.5.4	新的控制方案	340
9.5.5	闭环动态仿真	341
9.6	小型热电联供装置的模糊控制	344
9.6.1	概述	344
9.6.2	应用实例——小型汽轮机与锅炉的协调模糊控制	347
9.7	航机舰用燃气轮机推进系统的最优控制——线性二次型控制器	352
9.7.1	部分状态反馈线性二次型控制器	352
9.7.2	线性二次型 PI 控制器	354
第十章	汽轮机转子“复频法”建模与机组运行寿命管理	359

10.1	概述	359
10.2	汽轮机转子热应力的“复频法”建模	361
10.2.1	汽轮机转子体非稳定热传导的数学描述	361
10.2.2	蒸汽温升率引起的转子体全温差	362
10.2.3	转子体全温差引起的转子内、外表面热应力	363
10.2.4	模型的求解	364
10.2.5	数字仿真算法	366
10.3	模型简化	371
10.4	换热系数及物性参数变化的影响	373
10.4.1	几种典型组合的零、极点分析	376
10.4.2	放热系数的影响	378
10.4.3	物性参数的影响	379
10.4.4	热应力集中系数的影响	382
10.4.5	机组启动实例的数字仿真	384
10.5	大型汽轮机转子动态热应力的数学模型	389
10.5.1	控制方程	389
10.5.2	数学模型的建立	390
10.5.3	仿真算例与分析	393
10.6	转子寿命管理系统的构建	397

第一章 绪 论

1.1 数学模型与仿真是 21 世纪的关键技术之一

随着科技的迅速发展,尤其是计算机技术的迅速发展,在各个工业领域,甚至社会科学领域,建模与仿真日益显得重要.德国科研部已把这项技术列入 21 世纪重点发展的关键技术之一.

在能源领域,深入研究重大发电设备的动静态特性十多年来一直是国内外学者的重要研究方向.例如,建立大型电站锅炉的三维数学模型,对锅炉中的燃烧、气体流动、温度场、各种不同燃烧产物的形成等进行仔细研究,从而给大型电站锅炉的设计与运行提供必要的数据,使设计过程缩短,并使设计达到最优.再例如,为了使大型复杂的电站安全运行、正确处理事故,大型电站都有用于培训运行人员的模拟培训装置,定期地轮训运行人员,使他们具备正确操作、运行并处理各种复杂事故的能力.目前,我国已研制了 200 MW、300 MW 和 600 MW 火电站以及 300 MW 核电站模拟培训系统.此外,正在加紧研制用于电站设计的、具有精细数学模型的仿真系统.

在航天工业中,我国已建立装备先进的仿真中心,对各种运载系统、发射系统、火箭在空中飞行的姿态以及火箭本身进行精细的仿真试验.在航空工业中,对飞机本体的气动性能做大量的仿真试验,力争代替一部分大型、高速但十分昂贵的风洞试验.在化工领域,从新工艺、新设备概念设计,到中间试验,到现场调试,一直到人员培训无不和建模与仿真紧密相联.正确的仿真能替代一部分费财、费力、风险巨大的中间试验,使放大(Scaling-up)得到预期的效果.

可以说,建模与仿真从领域的覆盖面上已差不多包括现代社会的各个领域,如能源、交通、航空、航天、冶金、化工、生态、环境,以及人口、经济运行、金融运作等.从各个领域中的“纵向”来看:

- * 设计阶段(参数优化、动态特性、控制系统配置等).
- * 工业性试验阶段(放大的理论校核、模型的验证与完善等).
- * 整个系统的调试阶段(用仿真来提供调整的数据,避免做大量、昂贵的有时甚至是不可能做的实验,大大缩短调试过程,使设备及早投运).
- * 系统运行阶段(故障诊断、事故预报、预测性维修等).
- * 人员培训(各类不同的仿真培训装置).

.....

都需要建立数学模型进行仿真研究与试验.

随着人们对物理过程理解的不断深入、计算机软件和硬件的发展,数模和仿真技术必将不断细化、深化,必将更广泛地在各个领域发挥更大的作用.

1.2 热力系统动态学将成为一门新兴学科

1.2.1 技术发展提出的要求

1. 复杂性

* 在电力工业方面,单机容量日益增大,300 MW 和 600 MW 机组将成为我国的主力机组。由于要提高一次能源的利用效率,热力系统也日趋复杂;

* 我国的一次能源以煤为主,在本世纪末和下世纪 20 和 30 年代以前,煤仍将占我国总能源的 70%—75%,因而清洁煤技术对全世界,尤其对我国是十分重要的。目前,世界上正在迅速发展并有数个大型装置已进入商业化运行的燃煤整体煤气化蒸汽/燃气联合循环(IGCC)、第二代增压流化床锅炉联合循环(Second Generation PFBC-CC)、常压循环流化床锅炉联合循环等,它们都是极为复杂的系统。

* 由于我国电力供应峰谷差越来越大,有些地区达 30%,很多大型机组(如 200 MW、300 MW 机组)要求进入调峰,起停频繁,这引起一系列的热力系统动态和材料、燃烧等方面的问题。

* 为了回收能量,在石化工业中,在很多流程含有复杂的动力系统,如催化裂化系统中的能量回收系统。从催化剂还原的再生器中排出的高温并具有一定压力的烟气,进入透平做功,带动供再生器压缩空气的压气机。此外,在石化工业中,在很多流程中都含有燃气轮机、透平、压缩机等。

* 在冶金工业中亦具有复杂的热动力系统,如为了回收高炉煤气的压力能,在很多高炉中装有炉顶压差回收透平。目前,又正在发展利用高炉煤气作为燃料的蒸汽/燃气联合循环。

2. 耦合性

从上而几个例子可以看出,技术的发展必然导致热动力系统的复杂化。在这种情况下,数以百计、千计的各种设备有机地组合在一起,其中很多设备在高温、高压和高速旋转条件下运行。这些设备相互之间紧密耦合,一个设备、一个过程参数的变化会带来多方面的后果。例如,锅炉中用挡板调节蒸汽再热温度,就会引起其它参数的变化;蒸汽注入循环(陈氏循环)中蒸汽注入量和燃烧室中燃料量及燃气的压力、温度紧密耦合;又例如,上述的 IGCC 中,整个系统由气化炉系统、煤气净化系统(包括煤气显热回收系统)、蒸汽轮机系统(包括余热锅炉系统)、燃气轮机系统、空气分离系统等组成,系统十分庞大,耦合程度大(见图 1-1)。可以说,这些庞大、复杂系统是“牵一发而动全身”。不了解子系统之间的耦合,不了解各个系统的动态特性,就不可能配置合适的控制系统,以保证整个系统安全运行。如果把系统的“界面”扩大,则每一个的热动力系统还要和其它的系统耦合,如汽轮发电机组与电网,动力设备和工艺流程及外界条件,从纯技术问题变成技术与经济的耦合,如图 1-2 所示,或称之为广义耦合。

3. 经济性

对一个大型复杂热动力装置的经济性要求是非常高的,不仅要求在设计工况下各个

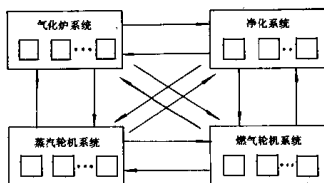


图 1-1 IGCC 各子系统之间的耦合

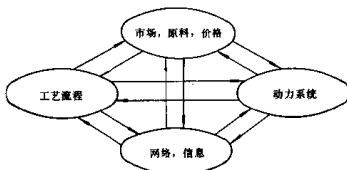


图 1-2 热动力系统的广义耦合

参数的优化,还要保证在非设计工况下的参数优化,还要使各子系统均处在最优状态下.对发电厂来说,应在线监测整个电厂的能量平衡,发电热耗等,优化炉膛的燃烧过程,优化透平、压气机内部的流动过程.汽轮发电机组中的锅炉排烟温度下降 1°C ,整个发电热耗便会下降 $4.2 \text{ kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})$.

4. 环境保护要求

由于热力设备是一个很大的环境污染源,因而人们对热力设备的排放十分关注.减少温室气体 CO_2 的排放,减少形成酸雨的 SO_2 的排放,减少对人们健康十分有害的 NO_x 排放,已经成为全世界关注的热点,更不要说烟尘了.所以,在热力系统建模中还需把环保要求考虑进去,建立在不同燃料、各种不同运行条件下, SO_2 、 NO_x 等的生成模型,从而增加了建模的难度.

5. 可靠性要求

对一些大型热力装置要求具有很高的可用率.大型电站停运一天,大型化工企业停产一天,都会带来巨大的经济损失和极其严重的社会影响.在这个背景下提出了在线监测和故障诊断问题,使之能早期对事故的发生、发展得到必要的信息,以便及时采取必要的措施.此外,还提出了按设备状态进行维护、检修的问题,以减少昂贵的检修费用和过多的

备件积压,尽量缩短停机时间。

1.2.2 热力系统动力学是学科的交叉

从上节所叙述要求出发,随着计算机及其应用的迅速发展,在研究、实现的手段和工具上,在所研究对象的扩展上,热力系统动力学已成为一门多学科横向交叉、渗透、集成的新学科,它至少是以下几个学科的综合:

- * 控制理论及其应用。
- * 计算机软件及硬件和它们的应用。
- * 优化理论、方法与实践。
- * 可靠性理论与方法,故障诊断。
- * 信息理论与方法,可靠数据的获取和处理,不良数据的剔除。
- * 数据库,数据压缩,数据传输。
- * 人工智能,专家系统;人工神经网络,模糊理论与方法;专家知识的积累与表达。
- * 流体力学(叶轮机械通流部分的流动诊断,叶片颤振,间隙流动激振,轴承油膜刚度及其稳定,油膜振荡等)。
- * 传热传质学(流化床锅炉中的气固两相流,锅内的气液两相流,它们的稳定性等)。
- * 化学动力学,燃烧学。
- * 转子动力学,结构力学(如机座刚度与振动以及与机组振动的耦合等)。
- * 材料科学(材料性能,温度场,应力场,蠕变,疲劳,寿命,裂缝扩展等)。
- * 环境科学。

.....

这些学科本身相互重叠、交叉,如图 1-3 所示。

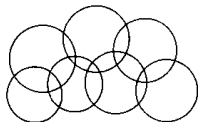


图 1-3 热力系统动力学的学科交叉

从而,热力系统动力学已逐步进入一个新的时代,和以前的单纯热力计算、装置运行、简单的控制有很大的不同,必须建立一个学科贯通的概念(Transdisciplinary Concept)

1.2.3 热力系统动力学的主要内容

1. 模型方面

* 建立热动力系统中一些特殊设备的精细数学模型及模型的校核(Model Validation),如煤气化炉、循环流化床燃烧锅炉、加压循环流化床燃烧锅炉、碳化炉、高温辐射废热锅炉,等等。这类模型应能用于设计目的,要尽可能详细地反映内部物理、化学过程,能够对对象进行“全尺寸”性能仿真,可以灵活地改变各种外界条件、结构、尺寸及不同的原料,从而进行方案比较。此外,这类模型还可以用于现场调试、开发新型装置、改进设备。利用这种模型,进行必要的简化还可用于实时仿真系统。

* 面向对象的图形化模块式建模方法,对一些复杂的热动力系统,通过典型模块搭建,能迅速、方便地分析其动态特性,在配置了多层次、多回路控制系统后,研究其闭环特性,应在已有商业化软件(Mat Lab, Dymola, Simulink, Lab View 等)的基础上,建立静、动态仿真平台,建立丰富的各种层次的模型库,建立合理的流体网络的处理方法,等

等。

* 非线性及分布参数对象的处理方法,热动力系统从本质上讲都是非线性的,在研究系统的稳定性时小偏差线性化方法是十分有用的。但是,人们还对这些系统在大扰动下的过渡过程,对事故下的控制对策感兴趣,因而在建模上应考虑全工况、非稳态工况、非线性等影响。分布参数对象,例如各种管道、热交换设备,都具有分布参数的特性,如何简单但又有足够的工程精度的处理是建模中的一个课题。

* 一些气动-机械耦合、机械-气动-电气耦合的精细数学模型,如轴系弯振、扭振与电网的耦合,与气体流动的耦合,通流部分的流动与振动、应力、疲劳的耦合,等等。

* 热动力系统的辨识。由于在一些热动力系统和一些大型设备中物理、化学现象的复杂性,全部用数学方法加以描述并加以计算是很困难的,有时也是不必要的。因此,应对一些重要设备,如燃气轮机、流化床锅炉、气化炉等开展现场辨识研究工作,以取得必要的、表征其动态特性的数据。辨识工作应与理论分析相结合,从中得出在一些重要设备中主宰其动态特性的“主导因素”,使复杂的问题得以简化。

对大型热动力装置进行辨识十分困难且有较大的风险。一般来说现场噪声、干扰大,辨识所用的信号的幅度又不能大,以免影响设备的正常运行。这时,辨识只能在闭环下进行。因而,如何结合具体现场情况对复杂动力设备和系统进行有效的辨识,在理论上和实践上都有很多问题需要进一步研究。但是,为了得到一些复杂的、一时理论尚无法正确描述对象的动态特性或是校验理论模型,系统辨识是一项十分重要的工作。

* 模型的简化。由于实际问题的复杂性,所得的模型经常是用偏微分方程来描述的,且是高阶次、非线性、时变的,如何针对不同使用目的,由非线性变为线性,由分布变为集中,由高阶降为较低阶,由时变简化成定常,由多个参数影响变成几个提炼出来的主导因素,……,是一个重要课题。可以是时域分析和频域分析的结合,解析解与数值解的结合,运用模态分析、模式识别、灵敏度分析来得到必要的模型。在这里建模人员不仅要具备良好的数学和控制理论的修养,还必需对研究对象中所发生的物理、化学过程有深入的理解,更重要的是具有工程师的感觉(feeling or sense)。

* 模型的实时化。这个问题和模型简化有密切联系。在很多场合,如建立复杂热动力系统的实时模拟培训系统,在最优、自适应控制中,在模型参考、模型跟踪控制中,在性能评估、故障前期分析中,……,都需要合适的实时模型。为了得到实时模型,不仅需要根据机理建立理论模型,还要有大量的实验数据,并使两者结合。在国外,目前正在推广一种在线模型修正技术,各个重要设备和整个系统在运行过程中,把实际的运行数据和模型计算所得数据不断地作比较,用其误差,进一步去修正其数学模型中的若干个重要参数,使模型能真正反映实际的设备性能,并用于各种控制和预测中。

2. 仿真方面

* 针对一些复杂热动力系统的特殊仿真算法,加速收敛,减少迭代,降低对初值选择的要求。如数值和解析混合仿真,对一些基本方程先作必要的预处理,然后再用数值解,可以使步长加大,收敛性大大改善;如采用分块迭代方法,先子循环迭代,再总体迭代,采用多级、变精度模型以加速收敛等。

* IGCC 和第二代 PFBC-CC,循环流化率锅炉,以及石化冶金工业中的复杂动力装

置的实时仿真系统的研制.这类仿真系统可以分成两个层次,一种是用于操作人员的培训,要求实时,但模型的精确程度要求较低;另一个层次是用于设计、研究,可用于各个子系统及整个系统的优化、动态特性的研究,控制系统的配置.亦可用于开发大型复杂热力系统的运行状态分析和故障诊断软件,如运行报警信号分析、运行状态分析及障碍补偿、事故预报及运行指导、运行专家系统的研究等.

- * 面向对象的图形化模块化建模技术.

3. 故障诊断方面

(1) 一些基础性研究,如:

- * 机电耦合系统动力学(电网扰动-轴系扭振).
- * 油膜振荡,油膜稳定性,油膜刚度.
- * 柔性、高速、多支点转子动力学.
- * 气流对叶片振动的诱导(颤振).
- * 间隙流对汽轮机转子振动的影响.

(2) 在线监测

- * 高速转动转子振动的监测、评估.
- * 透平、压气机的流动过程的在线监测与诊断.
- * 大型复杂热力装置的效率在线监测与分析.
- * 热力系统如凝汽器、除氧器、高压加热器、低压加热器的运行监测与优化运行.
- * 锅炉炉内过程和锅内过程的监测与分析,燃烧过程的监测与分析(如用火焰图像处理来分析燃烧稳定性、燃烧效率、 NO_x 的生成等).

- * 启动、调峰运行方式的在线指导.
- * 高温、高压、高速部件的寿命管理.

(3) 专家系统

故障诊断的关键问题之一是建立切合实际的专家知识库.这是一件工作量极大并极其繁琐的工作,如何针对一些主要设备,在大量长期运行的基础上,积累专家知识,提炼出有理论依据并有实践校核的规则.例如,对汽轮发电机的转子振动来说,虽已积累了大量的经验,但仍缺乏系统化的归纳.根据有经验的现场工程师和专家的意见,汽轮发电机组转于振动的专家知识至少包括五个方面的内容:

- * 振动频谱分析及数据处理(一倍频,二倍频,频谱分析等).
- * 故障部位的判断确定.实践证明,先根据经验找出故障的部位,再逐步深入剖析其原因是一种有效的办法.如何判断,需总结专家丰富的经验.
- * 振动的变化特性及相位变化特性(幅值 A 变化速率 $\frac{dA}{dt}$ 有实增型、快变、慢变及渐变等几种类型,相位变化特点有相位旋转、角度部分变化及相位不变等几种情况,各种不同情况都对应特有的一种或几种故障原因).
- * 振动与相关量的关系(如振动与负荷,新蒸汽及再热蒸汽的压力、温度、排汽温度,凝汽器真空,润滑油温,油压,机组的相对及绝对膨胀,发电机有功及无功负荷等的相关关系).

* 机组的结构分析(三支承,四支承,轴承座形式,轴承结构,联轴器结构,排汽缸与凝汽器的连接方式,发电机冷却方式,等等)。

所以,就从目前国内研究得最多的机组振动来说,离建立真正的专家知识库还有相当距离,其它方面的专家知识库,差距就更大。

(4) 一些主要设备状态的新型测量方法,如:

* 锅炉管排的磨损,运行过程中的检漏(声学方法)。

* 发电机绕组短路打火(无线电电波方法)。

* 转子裂缝和叶片裂缝的在线测量。

* 透平叶片、主汽阀的损伤(用同位素方法测量)。

(5) 研究适合于大型复杂热力系统的分层次、分布式智能性能监测与故障诊断的理论与方法,深入研究新型推理机制,研究各子系统之间的故障耦合,故障传播,……。这里还包括数据的采集、处理、压缩、传输、冗余分析、自诊断及容错控制技术以及计算机的并行处理技术等。

1.3 有关建模复杂性的考虑

随着人们对于复杂热力系统和重大设备中所发生物理、化学过程的不断深入了解,模型变得越来越复杂。这是好事,有助于我们对客观事物的理解更加深刻。但是,即使是这样,在基本方程的基础上用数学方式对过程进行描述总是有局限性的,总要先作很多假定,这些假定是否一定基本符合实际必须进一步验证。在某种意义上说,模型的复杂程度是一个“无底洞”,问题是如何掌握好一个“度”,在什么情况下用什么样的模型就能基本满足工程实际的要求。

1.3.1 建模的层位问题

建模首先要考虑的是所建模型的用途,不同层位的用途就有不同层位的模型。层位——表征对象的一定特性的描述水平。相互间有联系的层的总和组成数学模型。层位的选择取决于具体的研究目的,且不是唯一的。在分级结构中,层次的位置愈低,对象各方面的描述就愈详细;层次的位置愈高,较宏观的研究目的就愈为明显。显然,每一层位是由更低的层次的总和组成的,如图 1-4 所示。

例如,对上述的 IGCC 系统,它由十余个子系统组成,在研究整个系统的动态特性时,可以用各个子系统比较简化的模型,对这些子系统(如煤气化系统)的重要设备(如煤气化炉)只要有进口和出口的相关参数以及它们之间比较粗略的响应关系,(如用 $\frac{k}{Ts+1}$ 或是 $\frac{k}{(Ts+1)^n}$ 来近似)。若要研究下一层,专门分析煤气化炉的特性,则要对它建立更详细的数学模型,例如把整个炉子分成若干个小室,研究每个小室的化学反应、能量平衡、质量平衡等,然后把小室联结起来。若再进一步,要研究气化过程的进一步细节,就必需使模型更进一步细化,要描述碳颗粒在炉内的详细过程,颗粒中的挥发分析出,表面碳燃烧,颗粒爆裂,……,对内部流动从一维处理变成三维处理。总之,目的不同、层次不同,模型也就不同。不要在研究较宏观的问题时采用低层次的模型,以免带来不必要的仿真的复杂化。

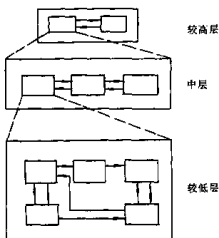


图 1-4 分层模型结构

还可以举一个燃料电池系统的例子。燃料电池是一种新型无噪声、污染小、效率高的发电装置，国外均在大力研制，尤其是日本和美国。对它研究的模型大致可分成四个层位，如图 1-5 所示。

分层位问题也就是对客观事物观察的出发点问题，是宏观，较宏观，中观，较微观，微观，不同出发点就应建立与之相应的模型。

1.3.2 简单→复杂→简单

作为一个工程师来说，我们总希望用简单的模型来说明问题，在最开始阶段，限于对客观事物的理解程度，所建立的模型是较粗糙和原始的（primitive），但随着对客观事物了解的深化，模型

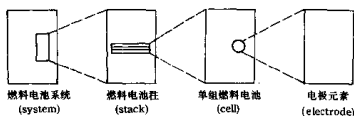


图 1-5 燃料电池系统分层模型结构

就不断复杂化，从线性变为非线性，由低阶变为高阶，由定常变为时变，由集中参数变为分布参数，等等。这些复杂的描述给我们带来新的认识。但是，从最后模型应用的角度来看，我们希望模型是简单的、物理概念是明确的，这就要通过一系列的工作，提炼出影响过程的主导因素，删除一些不必要的次要因素，必须完成从原始、简单→复杂→高层次的简单的螺旋上升过程。现以燃气轮机为例来说明。

在最开始时，我们只考虑在过渡过程中作用在转子上的透平扭矩、压气机扭矩和负载扭矩的不平衡，引起转子的加速或减速，透平和压气机扭矩的计算都用它们的在稳定工况下取得的特性曲线。这时燃气轮机可用一阶惯性环节来描述。若干时间后，我们通过对原苏联固定式燃气轮机 TT700-12 用输入正弦波的燃料扰动进行辨识，从所得的频率特性来看，转子部分显然是一个高于一阶的环节，究其原因，发现在过渡过程中燃气和气道壁面（包括透平叶片表面）有不稳定热交换现象。有了这个认识就建立该现象的数学模型，得到了较好的结果。但是，进一步分析表明还有很多现象没有考虑，如：

- * 在过渡过程中透平和压气机叶片叶顶与汽缸壁之间的间隙和稳态不一样，从而影响透平、压气机的效率。

- * 在过渡过程中，由于透平密封间隙与稳态时不同，从而叶片冷却空气也与稳态时不同，进入主燃气流的空气量不同，影响透平的出力。

- * 燃烧过程相对喷油量有滞后现象。

- * 在压气机中叶片表面与通过空气也有热交换现象，虽总热量不多，却会影响叶片表面