

985359

高等学校教材



火电厂仿真

华中理工大学 张家琛 编



高等学校教材



火电厂仿真

华中理工大学 张家琛 编

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书理论联系实际,系统地介绍热力发电厂仿真的原理和方法。全书共七章,重点阐述火电厂热力设备及其系统仿真模型的构造、热力系统的仿真和分析方法;紧密结合大型机组的主要设备和辅助设备,介绍各种建模方法并列举大量实例;附有系统辨识和火电厂热力系统仿真程序等。

本书用作电厂热能动力专业本科生和研究生选修教材,也可供电厂仿真培训人员和工程热物理学工程技术人员参考。

高等学校教材

火 电 厂 仿 真

华中理工大学 张家琛 编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市地矿局印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 12.75印张 288千字
1994年10月第一版 1994年10月北京第一次印刷

印数 0001—1590册

ISBN 7-120-02013-7/TK·302

定价 7.30 元

前 言

计算机仿真是计算机应用的一个分支, 30年来, 已广泛应用于各个领域, 是分析、设计和研究问题的强有力工具。世界上第一座DRESDEN核电站仿真装置于1968年在美国建成, 标志着全电站的仿真工作进入了新的阶段, 随后各种电站的仿真装置得到了迅速发展。70年代末, 世界上的电站仿真装置尚不足100座, 进入90年代时就已经很普遍应用于电站的培训和研究工作了。

为适应大型机组的需要, 1984年我校为国内举办“计算机在汽轮机中的应用”研讨班时, 编者曾编写了《火电厂的计算机仿真技术》讲义并开办讲座, 经过几轮研究生和本科生的教学和科研实践, 又编写了《热力设备的优化控制与仿真》讲义, 本书就是在此基础上, 参考国内外有关资料编写的, 期望能对仿真技术在热能动力工程的应用中起到一定的作用。

本书的主要特点是紧密联系实际, 介绍火电厂热力过程仿真的原理和方法, 讲究实用。现代火电厂的热力系统是一个复杂的系统, 在有限的篇幅内不可能涉及到火电厂的所有方面, 因此, 编者力求在保证热力过程完整性的基础上作必要的删繁就简, 突出主干, 把重点放在热力设备仿真模型的构造、热力系统的仿真及其分析方法上, 使读者掌握电厂热力设备仿真的基本原理和方法, 并加以应用。

全书共七章, 前三章是在分析系统的基础上介绍仿真的基本原理、方法、系统辨识和模型建立的基本理论。第四章介绍发电厂热力系统及其辅助设备数学模型的建立和仿真方法, 其中理论建模法和黑箱建模法已得到了普遍的应用。第五章以热力过程为基本系统, 全面介绍发电厂非线性模型建立的基本原理和方法。第六章介绍两种线性模型建立的原理和方法, 一种是非线性模型的线性化建模法, 另一种是单元体理论的线性建模法。作为应用, 第七章介绍发电厂仿真系统的组成、程序的编制和仿真结果的分析方法。为了理论联系实际, 书末还附有连续系统仿真程序、系统辨识程序和发电厂热力系统仿真程序, 以供读者参考。

本书的大纲曾经原能源部电厂热能动力教学委员会热力发电厂教学组会议审定, 并得到该教学组和华中理工大学汽轮机-锅炉教研室同志们的帮助, 在此一并表示感谢。

本书由浙江大学郭丙然副教授担任主审, 对文稿进行了仔细审阅, 并提出了宝贵意见, 编者表示衷心的感谢。

编写火电厂仿真这类书籍在国内尚属初次尝试, 因水平有限, 书中的缺点或错误在所难免, 欢迎读者批评指正。

编 者

1990. 11

84009/09

目 录

前 言

第一章 计算机仿真概述	1
§ 1-1 研究问题的方法	1
§ 1-2 计算机仿真技术简介	2
§ 1-3 系统及其性质	3
§ 1-4 系统的数学模型	6
§ 1-5 仿真系统的组成与分类	10
§ 1-6 仿真技术在热力发电厂中的应用与发展趋势	11
第二章 系统模型的类型及其仿真方法	14
§ 2-1 数学模型的表示法	14
§ 2-2 连续系统的数学模型及其仿真	15
§ 2-3 连续系统离散化模型的数字仿真	24
§ 2-4 采样系统的数字仿真	29
§ 2-5 系统的非线性与线性数学模型	33
第三章 系统的模型与系统辨识	36
§ 3-1 系统模型的建立与系统辨识概述	36
§ 3-2 系统理论模型的建立	39
§ 3-3 一元回归分析模型	46
§ 3-4 多元回归分析模型	49
§ 3-5 系统的离线辨识	55
§ 3-6 系统的在线辨识	63
第四章 发电厂辅助设备和管道的数学模型及其仿真	72
§ 4-1 发电厂辅助设备仿真概述	72
§ 4-2 热交换器的数学模型及其仿真	72
§ 4-3 冷却设备的数学模型及其仿真	76
§ 4-4 循环水系统的数学模型及其仿真	81
§ 4-5 泵与风机的数学模型及其仿真	85
§ 4-6 管道系统的数学模型	89
第五章 发电厂热力系统的非线性数学模型	93
§ 5-1 发电厂热力系统仿真概述	93
§ 5-2 建立热工对象数学模型原理	93
§ 5-3 发电厂热力过程的仿真系统	95
§ 5-4 炉膛传热的数学模型	97
§ 5-5 过热器传热的数学模型	101
§ 5-6 省煤器和空气预热器的数学模型	111
§ 5-7 锅炉燃烧效率的数学模型	112

§ 5-8 汽轮机及其调节阀的数学模型·····	114
§ 5-9 给水系统与水位控制数学模型·····	117
§ 5-10 发电厂热经济指标数学模型·····	121
§ 5-11 模型的评估与预测·····	123
第六章 发电厂热力系统的线性数学模型 ·····	125
§ 6-1 线性化模型概述·····	125
§ 6-2 混合式热交换器的线性模型·····	126
§ 6-3 表面式热交换器的线性模型·····	128
§ 6-4 汽轮机的线性模型·····	132
§ 6-5 调节阀的线性模型·····	136
§ 6-6 发电厂热力系统的线性模型及其仿真·····	139
§ 6-7 发电厂单元体线性数学模型·····	141
第七章 发电厂的计算机仿真系统 ·····	147
§ 7-1 仿真装置的类型及要求·····	147
§ 7-2 数据采集与预处理·····	149
§ 7-3 发电厂开环监控系统及其仿真·····	152
§ 7-4 火力发电厂的计算机仿真系统·····	155
§ 7-5 火力发电厂的仿真程序及其应用·····	158
§ 7-6 火力发电厂热力系统的仿真分析·····	162
附录 A 连续系统龙格-库塔法数字仿真程序 (DSPRK) ·····	167
附录 B 系统(或对象)的辨识程序 [IPS(P)] ·····	169
附录 C 200MW机组火电厂热力系统仿真程序 ·····	174
附录 D 200MW机组火电厂仿真程序变量表 ·····	193
附录 E 火电厂仿真程序运行结果(举例) ·····	195
参考文献 ·····	197

第一章 计算机仿真概述

人们在从事生产活动的时候，总是不断地通过生产实践和科学实验，总结经验，推陈出新，获得科学技术的进步，促进生产的发展，推动社会的前进。

随着计算机技术的发展，其应用愈来愈广泛。仿真技术作为计算机应用的一个分支迅速崛起，预示着研究问题方法的革新，它在军事、宇航、核能等领域应用所获得的成功，开辟了计算机仿真的广阔途径，现在，不仅发展到电力、冶金、石化、机械等各工业部门，还进一步扩展到交通运输、物资管理、生态系统、社会经济等各领域。实践表明，仿真技术作为研究问题的重要手段，已普遍受到人们的重视。

§ 1-1 研究问题的方法

为了提高生产力，人们在认识事物、从事科学研究的时候，首先遇到的问题是采用什么技术路线和研究方法，才能使研究结果既方便又经济，并卓有成效。到目前为止，人们对于系统（或对象）特性的研究方法，可概括为三种：

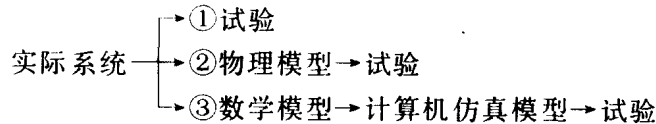


图1-1表示了这三种研究方法的关系。

第一种方法为在实际系统上进行试验的所谓直接试验方法，通常称为实物（现场或工业）试验技术。

第二种方法称为一次模化试验技术，这是一种在计算机出现以前早就采用的方法。这种试验技术的理论基础是相似理论，即用了一个与实际系统相似的较小的物理模型进行研究，在取得成功的基础上，再开发新产品或进行技术革新。这也是实物试验的一种，但几何尺寸要比实物小十倍、百倍之多，通常称为物理模拟试验。例如小型模拟锅炉、小型模拟汽轮机、模拟空气动力场、模拟转子试验台、模拟调节系统等。

第三种方法称为二次模化试验技术，这是一种首先建立系统的数学模型，然后通过电子计算机应用数学模型进行仿真的技术。这种仿真有时纯粹是采用计算机进行，有时也介入实物，其显著的特点是以计算机为主体，是伴随着计算机的出现，在推广应用的基础上发展起来的。

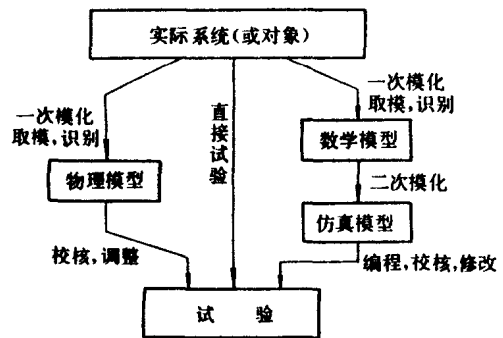


图 1-1 研究问题方法示意图

在对研究方法作出决策的时候，人们总是力图使研究工作付出的代价最小，而获得的效果最大。对于热力发电厂来说，随着设备的大型化、复杂化，采用现场试验方法的困难很大，不仅直接影响设备的安全，动用较多的人力、物力，占用较多的时间，经济效果差，而且需要现场的密切配合，例如组织机组的热力试验，其繁琐和困难的程度是人所共知的。

一次模化试验技术，越出了现场的局限，研究人员在进行试验的时候，取得了较多的自由，无疑是前进了一步。但是，这种试验方法仍然是既花钱又费时，在改变试验的方案时，灵活性也较小。例如，建立一个小型汽轮机模拟试验台，耗资以百万元计，十分巨大。

计算机仿真的优点是既安全又省时，灵活性特别大，虽然初投资可能较大，但是，它的适应性强，应用范围广，一经建成，便可长期受益，许多其它方法不可能进行试验的问题，计算机仿真却有可能进行。

在总结各种试验方法的时候，我们认为现场试验、物理模拟试验终归是不可避免的，但是，计算机的仿真越来越多地采用的趋势则是明显的。

§1-2 计算机仿真技术简介

一、仿真的定义

仿真的直接含义就是模仿真实的事物，也就是用一个模型来模仿实际的系统。仿真是不可能完全等同实物的，但是，最基本的内容则应该相同，即模型必须反映系统的主要特征或本质特性。

在“国际标准化组织（ISO）标准”的《数据处理词汇》部分的名词解释中，对模拟与仿真给出了明确的定义，“模拟”（simulation）是指选取一个物理的或抽象的系统的某些行为特征，用另一个系统来表示它们的过程。“仿真”（emulation）是指用另一个数据处理系统，即主要是用硬件来全部或部分地模仿某一数据处理系统，以至于模仿的系统能像被模仿的系统一样，接受同样的数据，执行同样的程序，获得同样的结果。鉴于计算机应用日趋广泛，目前实际上已将上述“模拟”和“仿真”的含义都统归于仿真的范畴，而且都用simulation来代表，并泛称“仿真”。在本书中提到的仿真，也是这样泛指。而涉及模拟一词，在应用计算机时，是指模拟机仿真，在过去的热工对象模拟研究中，习惯上仍称为物理模拟。

根据上述分析，我们可对计算机仿真给出一个明确的定义：将一个能近似描述实际系统的数学模型，进行二次模型化，变化一个仿真模型，然后把它放到计算机上进行运转的过程，称为仿真。

用模拟计算机进行仿真的系统称为模拟机仿真系统，用数字计算机进行仿真的系统称为数字仿真系统。

从图1-1看出，一次模化试验技术和二次模化试验技术是有区别的。一次模化试验技术是通过系统的取模和识别，研究实际系统与物理模型的关系，属于物理模拟。二次模化试验技术中，一次模化是通过系统的取模和识别，研究实际系统与数学模型之间的关系；二次模化是研究数学模型与计算机之间的关系，即系统仿真技术。

系统仿真与一般在计算机上进行的数值计算是不同的，如热力计算、水力计算、强度计算、控制系统的静态计算等，这些计算都属于静态计算。

动态计算虽然也研究系统的空间状态和时域的关系，但它的重点是研究阶跃扰动后系统从扰动时刻起到稳定过程为止的空间状态和时域的关系。仿真则还包括系统连续受到扰动后，系统参数的随机变化过程。因此通常又把仿真定义为系统动态模型在计算机上的运转过程。由此可见，动态计算不过是系统仿真的一个特例。

系统仿真也不限于调节系统，可以仿真一个部件、一台设备、一个热力系统、一个发电厂，还可以仿真一个能源体系、交通运输、物资管理、生态系统和社会经济问题等。

二、仿真的步骤

系统仿真的整个过程，可归纳为下面五个步骤。

(1) 根据系统研究的目的和范围，建立系统的数学模型。

(2) 由于仿真机型的不同，使用仿真语言的不同，应将数学模型转换成能在计算机上进行运转的仿真模型。

(3) 编写仿真程序。

(4) 对仿真程序进行调试、校核和修改，在确认程序正确后进行运转。

(5) 对仿真结果进行分析、评价，最终的结果是应用于决策。

这样，整个仿真的过程，就涉及到实际系统、数学模型和计算机三个部分，而试验的主要工具自然就是计算机了。

§ 1-3 系统及其性质

无论是社会问题或生产问题，决策都是一个复杂的过程，正确的决策来源于对系统正确的分析。

所谓系统分析，就是有次序地、及时地获取和研究与一个给定决策有关的特定系统信息的过程。根据这一定义，系统分析的任务首先是获得信息，然后才是建立模型，只有掌握大量的信息，并从中找出其规律性，才能建立正确的数学模型，所以一个正确的决策过程应该是：

(1) 确定那些对预期决策有关的信息（或数据）；

(2) 获得这些有关信息的规律性或计划；

(3) 对所得的数据进行处理、分析，并作出正确的评价。

由此看来，正确的决策过程应该是从实际问题出发，经过系统分析，最后作出决策，如图1-2。

一、系统的定义和特性

我们在学习《电厂热工过程自动调节》时，接触到调节系统；在学习《热力发电厂》时，又接触到热力系统，对于这些系统的作用、组成、工作原理和特点，都已比较熟悉。当我们涉及到系统仿真时，“系统”的含义则广泛得多，有必要对它给出一个明确的定义，以便深入理

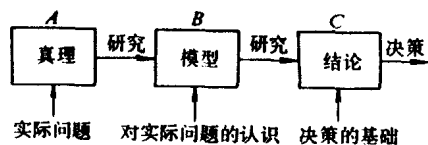


图 1-2 系统的决策过程示意图

解系统的性质、类型及其特点。

从广义观点看,系统的定义可表述为:一个系统就是由一些具有特定功能的、相互联系的元素集合构成的确定的统一体。

全面理解这一定义,对我们研究系统是十分有意义的。下面我们根据这一定义,进一步分析系统所具有的特点:

(1) 系统是具有一定功能的,研究不同系统的特定性能时,就要相应采取不同的分析方法。例如,汽轮机的调节系统要完成调速的功能,锅炉给水调节系统要完成给水调节的功能,发电厂的热力系统(包括其中的设备)要完成能量转换、输送和做功的功能,其特性与前两者完全不同,它们的研究方法不可能完全一样。

(2) 系统具有整体性,系统中的各个部分是相互联系,不可分割的。如控制系统中的测量元件、调节器、执行机构和控制对象,是组成系统的统一整体,这些部分缺一不可;发电厂的热力系统也是一个整体,它由锅炉、汽轮机及其辅助设备、连接管道组成,这个整体构成了发电厂的动力循环。同样,把发电厂看作一个系统时,它由管理部门、生产车间、检修车间、供销部门、后勤部门组成,这些部门也是不可缺少的。

(3) 因为系统是由相互联系的元素集合而成的,所以系统具有相关性。实际系统内部可能比较复杂,一般来说,正是这种相互联系,使得系统并不简单地等于各组成部分之和。如果系统内部某一部分物理性质变了,则系统本身的性质也要改变。例如把链条炉改成煤粉炉,则燃烧的特性也随之改变。因此,当根据系统分析的结果改变系统设计时,新系统与原系统很不相同,那么,改变了的设计系统就必须重新加以分析。

(4) 在定义中的“确定”两字是指系统是可以辨识的。试图对不能清楚地辨识的某种系统进行分析是毫无益处的,甚至是徒劳的。因此,系统必须有某种目的——完成一定的功能,而不是想像中虚构事物的存在。系统中的各组成部分,如电网中的一个电厂,一个电厂中的锅炉、汽轮机以及它们的辅助设备等,同样也必须是可辨识的。

(5) 系统是有边界的。系统的外部边界确定了研究问题的范围,同时也确定了系统与外部环境的关系,例如,一个循环水系统、一台汽轮机、一个发电厂,甚至一个电网,其研究范围、研究目的和边界都是不同的。当只研究一个循环水系统时,它的外部条件就是汽轮机的排汽、冷却水量、气温等环境条件。把研究扩大到汽轮机或发电厂,也就是扩大了系统的外边界。

系统又是可分解的,如分解成子系统,子系统还可继续分解为更小的子系统,直到分解极限,它们也都有自己的边界。局部系统的边界称为内边界,整个系统的边界称为外边界。边界一经确定,也就确定了研究问题的范围和深度。

图1-3给出了一个系统边界的示意图,虚线框将系统和环境隔开来,而虚线框就构成了系统的外边界。如果系统范围较大,可把它分为A、B、C等各个子系统,有时为了分析方便,子系统还可分为更小的子子系统,例如子系统F又可分为a、b、c等。如果分解到此为止,则a、b、c就构成了系统的分解极限,它们也都各具自己的边界。在控制系统中系统到分解极限后的组成部分,通常称为基本环节。

在研究具体系统时,恰当地划分系统的外边界和内边界相当重要,外边界的确定,决

定了分析问题的范围或广度，内边界则确定了分析问题的深度。

无论是外边界还是内边界，它们都是客观存在的物理边界。例如一个系统的物理边界为时间的函数时，它可能代表不同的运行状态或不同的设计方案，当状态改变或修改设计时，物理边界也将随之改变。当然，有些

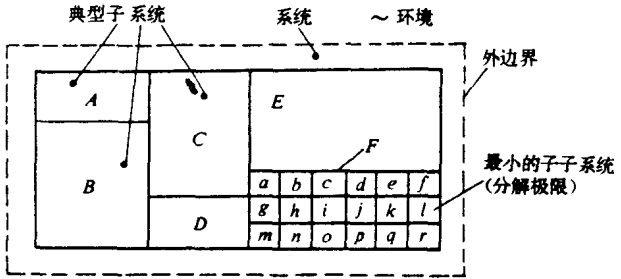


图 1-3 系统及系统的边界

系统的外边界和内边界往往不容易划分，需要根据研究的目标，才能确定哪些属于系统的内部因素，哪些属于系统的外部环境。但无论如何，没有明确的边界，将难以对系统作出正确的分析，因此，只有对所研究系统的物理、化学过程及其变化的规律性有所了解，才能使系统分析富有成效。

二、系统的性质

当我们要对一个系统进行仿真时，必须确定这是一个什么系统，它具有一些什么性质，在对系统进行研究时需作何处理。明确这些问题对建立系统的数学模型是十分重要的。

如果在系统中发生的变化主要是平滑的变化，即当系统的状态随时间连续变化时，这种系统称为连续系统。如果系统的状态不是随时间连续变化的，则这种系统为非连续系统。在实际过程中，完全是连续的或完全是非连续的系统是很难找到的。例如在发电厂中，机组正常运行时，负荷的增减过程虽有一定的偶然性，但由于锅炉从改变燃料、燃烧到能量转换，都有一个过程，汽轮发电机组也有惯性，因此，系统的变化可以看作是连续的。而机组的启动、停机、负荷急剧变化或突然甩负荷过程中，其转折点则是非连续的。

在研究系统时，如果系统中有一种形式的变化占优势，则可把该系统当作连续或非连续系统来重点研究，非优势部分则当作特殊情况来研究。

对于非连续系统，有时也可以看作连续系统来研究。例如把机组负荷的急剧变化看作瞬间完成时，可以把整个系统视为按转折点分成许多局部连续系统组成的非连续系统。

系统的性质也可按其状态分为连续或离散系统。离散系统有两种情况，一种是实际上存在的离散系统，如公共汽车到站时人们上下车，仓库中货物存与取，电厂中进煤和上煤等，这些行动均可视为“事件”，它们只在某些时刻发生，因此其状态的变化只是在离散时刻才产生的，这种系统称为离散事件系统，本书不作研究。另一种系统本身是连续的，离散则是人为的，例如，为了研究问题方便，把连续系统进行离散化处理，用离散化的研究来逼近连续系统，后面介绍的离散相似法仿真，即属于这种系统。

一个系统可以这样表示也可以那样表示的两重性，说明了一个极其重要的观点，即在描述一个系统时，并非完全按照系统本身的自然特性来分类，而是根据研究的目的来确定系统模型的类型，这表明研究系统的方法是多种多样的，可以根据需要甚至爱好来选择。

§ 1-4 系统的数学模型

一、建立系统模型的任务

前已述及，计算机仿真以数学模型为基础的。被研究系统的数学模型，是用来指导对该系统进行研究的，对于大多数的研究目的而言，建立系统的数学模型并不需要考虑系统的全部细节，而应着重考虑系统主要的、本质的内容。所以，一个模型不仅是用来代替系统的，而且应该是这个系统的简化和抽象。

对一个系统进行研究的目的不同，所收集与系统有关的信息也不同；由于不同的研究目的，关心系统的不同方面，或者对同一研究目的所采用的方法不同，都有可能从同一系统中建立不同的数学模型，因此表示一个系统的数学模型不是唯一的。但是当研究的目的相同时，研究的结果应该是一致的。

建立一个系统的数学模型，一是确定模型的结构，二是提供数据。在确定模型的结构时，不仅要确定系统的边界，而且还要明确系统中各环节的特性及其相互关系。提供数据的任务，则是要求所提供的数据能够满足系统中各环节相互间有确定的关系式。事实上，建立模型结构和提供数据不是两项独立的任务，而是一项任务中密切相关的两个方面。

二、模型的分类

在研究系统的时候，了解模型的分类方法是重要的，图 1-4 概括了模型的各种分类方法。

总的来说，系统的模型可分为实物模型和数学模型，实物模型是根据系统之间的类似性而建立起来的形象模型，属于物理模拟试验技术，本书不作介绍。数学模型是用符号和数学方程式来表示系统的抽象模型，其中系统的属性是用变量来表示的。当研究系统的静态时，系统特性是用变量间相互有关的函数式来表示的；当研究系统的动态时，系统特性表达为时间的函数。实物模型具有实体性，数学模型则具有抽象性，它们都代表系统的属性，反映了系统内部有关信息的联系，所区别的只是研究问题方法的不同。

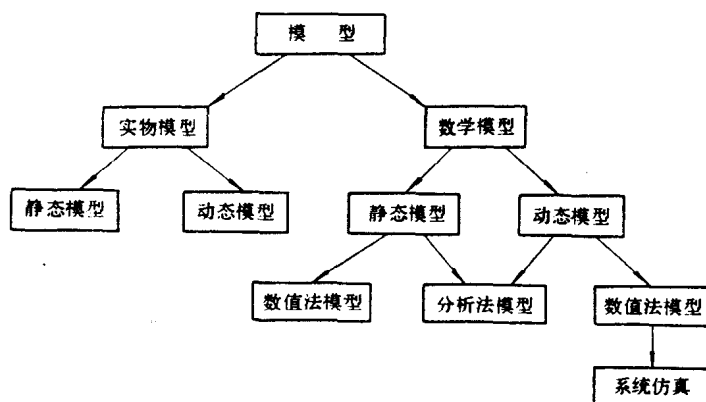


图 1-4 模型的分类

实物模型或数学模型都可以通过静态模型和动态模型来研究系统。静态模型仅表示系统处于平衡状态时各属性之间的关系或表达式;动态模型表示系统运动随时间变化的规律,是把系统属性值表示为时间的函数。

数学模型也可按连续系统或离散系统来分类。当我们研究的是一个连续系统时,可采用连续系统的模型或离散系统的数学模型,而当我们研究的是采样系统时,则必须采用离散系统的数学模型。

数学模型也可按其性质分成线性的或非线性的,这是大家比较熟悉的。一个系统到底属于哪一种模型,取决于系统本身的物理、化学过程,但在研究系统时,则有可能采用不同的模型,例如系统变量间的关系是非线性时,研究者既可用非线性模型来研究系统,也可以经线性化处理后用线性模型来研究系统,显然,后者是一种近似模型。

数学模型还可以根据反映系统属性的变量求解的方法来分类,这样,它又可以区分为分析法求解和数值法求解的数学模型。分析法(亦称解析法)是应用理论推导、演绎去求解模型的方法。在实际过程中,应用分析法仅能对一些方程的某些形式求解,所以采用这种方法时,就必须确定系统中可以用分析法求解的数学模型,并寻求最适宜的解法,这等于说我们研究一个系统时,一方面根据系统的特点去建立数学模型,另一方面又要求能用分析法求解的数学表达式,显然这种方法是受到限制的。

数值计算法是能用计算机程序求解数学模型的方法,由于这种方法是把系统的属性值推导为数字量,所以,可以充分利用数字计算机的长处,并能在计算机的允许范围内,得到任何指定误差的结果,精度十分高,是应用最普遍的方法之一。

此外,数学模型还可以根据获得的方法不同分为理论模型和黑箱模型,前者是根据系统的物理、化学过程推导得到的,后者是根据系统的试验结果,通过对数据的回归处理而获得的,比较容易为工程技术人员所接受,这两种模型在热力系统仿真中都得到广泛的应用。

从图1-4看出,系统仿真和数学模型的关系已十分清楚。所谓系统仿真,实际上就是用数值计算技术求解动态数学模型。换言之,数字仿真就是系统动态模型在计算机上的数值解。

三、模型的特点

在生产过程中,系统模型既有普遍性,又因系统任务不同而有其特殊性。下面我们结合发电厂热力过程来分析模型的特点。

1. 模型的复杂性

发电厂是一个大系统,它由许多性质不同的热力设备所组成,十分复杂。在发电厂的生产过程中,有不同的能量转换形式,有不同性质和不同状态的介质及其不同的流动状态,并同时发生多种化学反应或物理反应过程,其建模工作比控制系统复杂得多。

在建立复杂系统的动态模型时,应善于对系统进行合理的分解,即按不同的化学、物理过程,如燃烧、传热、流动、做功等,把系统分成许多子系统,这些子系统并不都是简单地按设备的类型来划分的,而根据系统的属性来划分更为合理。

在分解系统时,正确处理各子系统间的关系是十分重要的,因此要正确地选择系统中

的状态变量，充分保证信息的传递如实际过程那样进行。

2. 多回路多变量

如发电厂这种大系统就是一种多回路系统，有各种不同的内扰和外扰，有各种不同的控制量或操作量，还有大量的状态变量。环节的连接可能是并联的，也可能是串联的，甚至是交叉的。因此，系统的数学模型，是一个复杂的多元函数组成的数学模型。

3. 线性与非线性

发电厂生产过程十分复杂，有些环节是线性的，如汽轮机功率与调节级压力、抽汽量与汽轮机功率（凝汽式机组），都可认为是线性关系。同时，有些环节是非线性的，如炉膛传热与温度，工质的流量与压差、转速与油压的关系等都是非线性的，水蒸气状态参数之间的关系也是非线性的。线性特性可以应用叠加原理，非线性特性则不能叠加，因此必须有效地协调各环节之间的相互关系。

4. 分布参数

发电厂生产过程是一个动力循环，工质状态不仅随工况和环境条件变化，而且随时间变化，绝大部分参数是三维空间的函数，具有明显分布参数的特征，如过热器、再热器的参数是沿管长随时间变化的，汽轮机的流动为三元流动等。

5. 时间常数差别悬殊

在发电厂动力循环中，各设备的动态特性不同，其时间常数差别十分悬殊，例如汽轮机甩负荷时，其转速的变化十分迅速，锅炉的燃烧和传热则明显地滞后；又如主要研究汽温的变化时，因烟温的变化迅速，其过程可近似看作瞬时完成的；当研究烟气的动态过程时，因工质变化较慢又可近似地认为在短小时内没有发生变化等，这些因素的影响，在建模过程中都必须认真地对待。显而易见，近似的办法虽然能获得简洁的模型，但却可能使精度降低，因此应全面权衡。

6. 模型的综合性

要仿真一个发电厂，单纯依靠热力学理论来建模是难以实现整个动力循环的。一个最简单的例子是锅炉汽包的水位问题，由于汽包水位的开环不稳定特性，在剧烈的工况变化过程中很可能严重满水或严重缺水，结果导致整个循环的失控，因此，必须用控制手段，即要用控制理论的思想建立相应的模型，才能保证循环的实现。此外，汽轮机的调节阀等也有类似的情况。这意味着在建模过程中，要综合地利用各种理论手段，解决动力循环中的种种问题。

四、建立数学模型的原则

在这一节里，我们着重介绍建立数学模型的一些共同的、指导性的原则，以便从总体上了解建模过程中，对于一些重大问题处理的原则和方法，至于具体的建模步骤和方法，我们将从后面几章中介绍。现介绍建立系统模型的一般原则。

1. 建立系统的方框图

系统的方框图是用来指导系统研究的，它是对系统的最原则的综合。在拟定系统的方框图时，首先要明确建模的目的，是用于开发研究还是用于培训，是用于研究系统的动态特性还是静态特性，是重点了解系统的整体特性还是突出系统中的某一部分等，不同的指

导思想, 所得环节的多少、方程的数目及其变量的多少等都不相同, 其差别可能有数十以至成百个之多。

在明确研究目的之后, 系统的分解就显得十分重要了。一般来说, 可以根据设备的功能、介质的性质和过程的特点把一个系统划分成许多子系统, 子系统又是由许多环节组成的, 当不再往下分解时, 环节即分解的极限, 从而确定系统的外部边界和内部边界, 于是整个框图的雏形便形成了。

在进行系统的分解时, 可遵循以下原则:

(1) 按设备的功能和工作特点分解, 如循环水泵、给水泵、水位控制系统等。

(2) 按部件的属性来分解。其中最突出的是锅炉, 它的各部件属性差别十分悬殊, 因此, 可按传热性质相同、热负荷强度相近或介质的性质比较接近来分解, 例如分解成炉膛、烟道的烟气侧和工质侧, 汽包、下降管和水冷壁, 过热器, 再热器, 减温器, 省煤器和空气预热器等。金属的蓄热能力可融合在工质侧之中, 不受热部分的联箱可不单独建立环节等。

就是汽轮机部分, 其调节阀、速度级、高压缸和低压缸等, 也因其特性不同可分成许多环节。

(3) 根据系统的响应来确定方程。对于发电厂这样大的系统, 在划分系统和环节时, 必须明确取得一些什么中间状态响应, 最后输出什么响应, 从而确定相应环节的方程及其状态变量。

系统的输入(如扰动)和输出点, 应设置在环节的分界处。当有必要在分布参数的中间提出状态量时, 模型应该分成相应的区段, 例如同级过热器的高温段和低温段等。

总的来说, 建立方框图的目的, 就是简化系统内部相互关系, 每一个方框都用来描述系统的一个部分, 它们构成了系统的整体, 最概括地说明该系统的特点。

2. 相关性

系统的模型代表一个实际系统的简化形式, 它高度概括了系统中变量的相互关系, 因此, 模型中应只包括与研究目的有关的那些信息, 无关的信息不仅增加了模型的复杂性, 而且增加了求解的工作量, 甚至容易出差错。因此, 应该把与研究目的无关的信息排除在模型之外。

3. 准确性

一个不准确的模型不可能得到正确的研究结果, 而正确模型的获得, 有赖于对研究对象内部的物理、化学规律的熟悉程度和概括能力, 这是显而易见的。值得注意的是准确性往往与系统的简化和假设条件的正确与否密切相关, 这就要求我们根据系统的研究目的和研究范围, 把握环节的本质属性, 才能做到合理的简化, 简化的程度应由系统研究的精度要求来确定。

4. 集合性

建立系统的数学模型时, 需要进一步考虑的是能否把一些个别的实体组合成更大实体的程度。例如, 当我们单独研究汽轮机时, 为提高模型的精度, 有可能把它划分成进汽部

分、喷嘴、每一级等小实体；而当我们研究发电厂时，汽轮机只是系统中的一个实体，环节就不一定划分太细。

因此，集合是一种简化，它告诉我们在研究系统时，应考虑将某些环节集合处理，从而使模型更为简洁和明确，有利于集中研究某一侧面，突出研究的中心。集合性的主要考虑原则是对于实际设备（或部件）的每一种集合，不仅要充分考虑它们集合的可能性，而且还要能够给出其相互联系的关系式，该关系式应能反映这个集合的基本特性。

§ 1-5 仿真系统的组成与分类

前面已经提到，系统仿真就是系统数学模型在计算机上的运转过程。因此，用于系统仿真的一套软、硬设备，称为仿真系统。由于仿真研究是随着计算机的出现和推广应用而产生的，离不开计算机，所以仿真系统的主体是计算机。

仿真系统可按不同的方法来分类：

（1）按有无实物介入来区分，可分为实时（real time）仿真系统和非实时（non-real time）仿真系统。

（2）按是否闭环来区分，可分闭环仿真系统或开环仿真系统。而对于控制来说，又可分为闭环在线（on line）控制系统和开环离线（off line）监控系统。

（3）按系统运动过程的速度来区分，可分为快过程（fast process）仿真系统和慢过程（slow process）仿真系统。

（4）按使用计算机的类型来区分，可分为用模拟计算机组成的模拟仿真系统、用数字计算机组成的数字仿真系统、用模拟计算机和数字计算机组成的混合仿真系统和用微型计算机阵列组成的全数字仿真系统等。

用模拟计算机来进行仿真的主要优点是：在模拟机上进行的运算是“并行”的，因此，运算速度快；又由于在模拟机上进行的运算是“连续”的，因而更加接近于连续系统。它的主要缺点是：运算精度低，误差一般为千分之几。在实现一些特殊环节方面，不仅线路复杂，而且精度不易保证。对于采样系统和较多的逻辑判断系统，使用模拟机仿真比较困难。由于排板接线比较复杂，所以仿真的自动化程度较低。

用数字计算机进行仿真，可以做到整个被仿真的系统都包含在一组程序之中，因此，数字机仿真的优点是：仿真的自动化程度高，使用方便；运算精度高，一般可精确到六、七位有效数字；在逻辑判断处理和非线性环节的实现方面十分方便，程序和参数的修改比较容易。它的主要缺点是：由于运算过程是“串行”的，所以计算速度较低，对于实时仿真或寻优计算等方面，远不如模拟机快。

由于模拟计算机和数字计算机在优缺点方面有互补性，因此，由模拟机和数字计算机组成的混合仿真系统，就是在吸收各自长处的基础上发展起来的，它可以根据模型的不同要求，分别选用相应的计算机来实现，使仿真的精度和速度都能得到较好的保证。混合机有两种基本结构，一种是在模拟机的基础上增加一些数字逻辑功能，称为混合模拟机；另一种是由模拟机、数字机和混合界面三者联合起来构成的模拟-数字混合计算机系统，如图

1-5所示。

混合机仿真主要适用于以下情况：

(1) 要求与实物连接进行实时仿真，同时又有许多复杂函数需要数字机来仿真时。

(2) 对系统需要进行反复的迭代计算时，例如寻优参数、统计分析等。

(3) 对于一些用数字计算机控制的系统进行仿真时。

计算机仿真系统的选择，同所研究系统运动过程的速度和仿真的规模有密切的关系。对于慢过程的仿真系统，选用一台通用的数字计算机即可。对于快过程系统的实时仿真，在对计算机的运算速度要求很高时，可视情况选用以模拟机为基础，增加一些数字逻辑功能的混

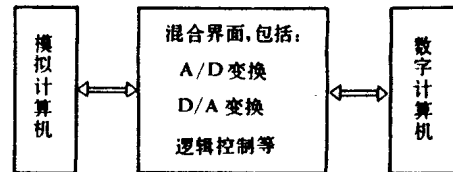


图 1-5 模拟-数字混合计算机系统

合模拟机或模拟-数字混合计算机系统。这种系统在实现自动化和编制程序方面，肯定是比较复杂的，需要有较多的计算机方面的基础知识。此外，由于这种计算机价格比较昂贵，除个别部门外，一般都较少采用。

由于数字计算机具有精度高、使用方便的特点，所以数字仿真愈来愈普遍，各种仿真语言的出现，大大加速了数字机应用的步伐。用微型机阵列组成的全数字仿真系统，更加灵活和方便，是一种较有发展希望的系统。

对一个发电厂进行仿真，考虑的问题是比较多的，所需的计算机容量也比较大，各种配套的外部设备也较多，这些不是多数研究人员所具备的，但对发电厂中的许多局部系统或设备来说，是能够利用一些小型计算机来开展仿真研究的。因此，仿真作为一条研究问题的途径，肯定会被愈来愈多的人们所接受。

§ 1-6 仿真技术在热力发电厂中的应用与发展趋势

一、仿真技术在火电厂中的发展

计算机制造技术的进步，计算方法不断发展，以及仿真技术在军事、宇航和核能研究等方面获得成功，有力地推动了它在其它领域的发展。火电厂的仿真技术也是在这个浪潮下迅速发展起来的，它的形成和发展大致分为三个阶段。

第一阶段始于50年代中期，是从建模理论到局部设备的研究开始的。1955年，Profon首先把仿真技术应用于锅炉的研究，他把研究分成建模理论、燃烧模型和锅炉部件模型三个部分，陆续地发表了许多有意义的研究成果，他的研究，既是电站仿真的开端，又为以后的研究开辟了道路。1958年，K. L. Chien等建立了第一个汽包锅炉的模型，创立了小范围内线性问题应用于燃烧和给水调节研究的理论。到了1960年，J. H. Daniels等人对大型锅炉-汽轮机单元机组动态分析的研究，经过了Dallas和Sauter的现场对比实践和Thompson的进一步完善，继续推动了仿真技术向全厂化发展。