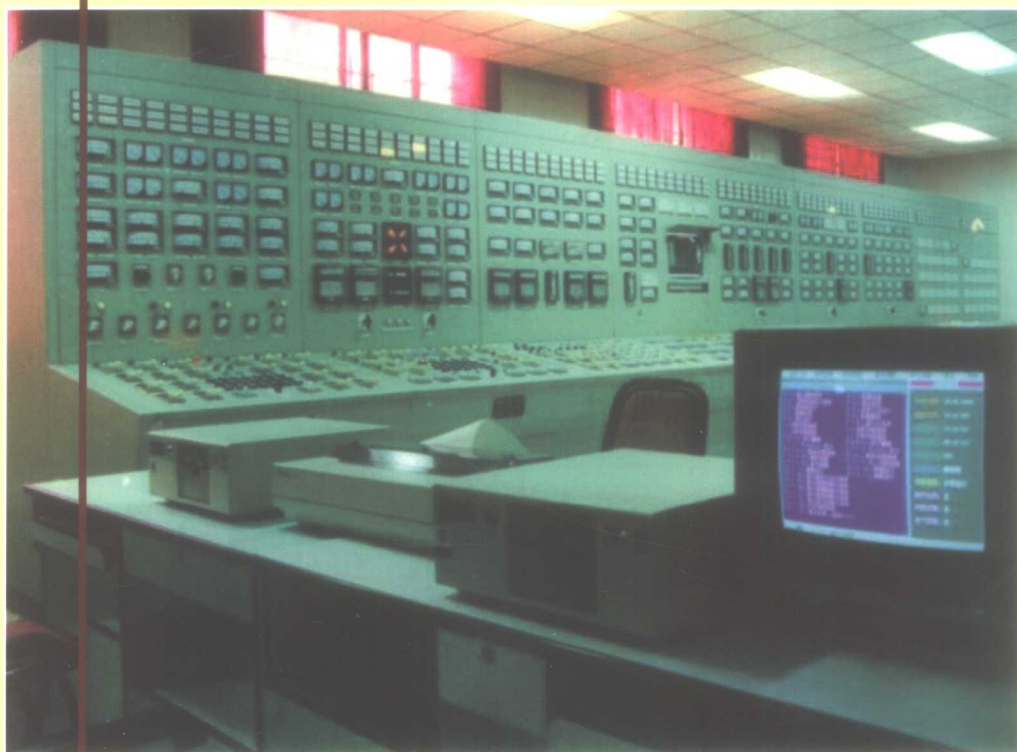


REDIANZHAN FANGZHENJI JI YUNXING

热电站仿真机及运行

主编 侯小刚



东南大学出版社

高等学校教材

热电站仿真机及运行

侯小刚 主编

东南大学出版社

内容提要

本书是一本机、电、计算机等学科相结合的跨学科教材。全书共4章,介绍了计算机仿真技术的一般知识及电站仿真机的基本构成与功能、仿真数学模型的特点。还介绍了热电站仿真机的热力系统及设备的运行。

本书适合于高等学校有关专业作为教材,也可供电站运行人员及各类电站仿真机培训人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

热电站仿真机及运行 / 侯小刚主编. —南京: 东南大学出版社, 2003. 1

ISBN 7-81089-133-2

I. 热... II. 侯... III. 热电厂—仿真机
IV. TM. 621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 085401 号

热 电 站 仿 真 机 及 运 行

出版发行	东南大学出版社
出 版 人	宋增民
社 址	南京市四牌楼 2 号(邮编:210096)
印 刷	河海大学印刷厂
开 本	787mm×1092mm 1/16
印 张	13
字 数	324 千
版 次	2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月第 1 次印刷
印 数	1—3000 册
定 价	20.00 元

东大版图书若有印装质量问题,请直接向发行科调换,电话:025-3795802。

前 言

随着电力工业的发展,发电设备向着高参数、大容量、高度自动化的方向发展,对运行人员的要求越来越高,原有的学徒式跟班培训方式已相对落后。由于计算机技术的迅速发展,仿真技术逐渐从航空航天、核电扩展到火力发电领域。近十多年来,我国建立了近百套电站仿真系统,配置在有关电厂、电力局培训中心、专业院校。电站仿真机培训电厂运行人员对电厂的安全、经济运行发挥了很好的作用;在有关院校的专业教学中,为提高学生的工程实践能力,亦发挥了很好的作用。

电站仿真技术是随着计算机技术在工业中的普遍应用而发展起来的,是计算机技术与电站设备、热工过程数学模型研究的有机结合。本书是一本机、电、计算机相结合的跨学科教材。本书对计算机仿真的基本知识、电站仿真机计算机系统的组成、I/O接口的处理作了阐述,并以50MW热电站为例介绍热电站热力系统、主辅机设备规范和特性及热电站仿真机的功能、使用方法。书中重点讲述机、炉设备及系统的运行,还对一些典型运行工况进行了分析。50MW供热机组属于高压机组,在我国石化、冶金、化工等企业自备电站及区域热电站中装机量较多,而目前热电站及其运行方面的公开出版物尚不多见。

《热电站仿真机及运行》作为南京师范大学动力工程学院电站运行课程、专业实习教材及电厂运行人员培训教材已使用多届。本书适合于高等学校有关专业作为电站运行课程、专业实习教材,也适合于电站运行人员及各类电站仿真机培训人员使用。

本书第1章由侯小刚、陈鸣山编写,第2章由侯小刚、陈敏编写,第3章由陈敏、唐博、侯小刚编写,第4章由侯小刚、邱瑞章、唐博、黄庆宏编写。全书由侯小刚统稿。

本书由浙江大学樊建人教授、南京师范大学陆全福副教授主审。审稿人对文稿进行了仔细审阅,编者根据审稿人意见对文稿进行了修改。在这里谨向审稿人表示衷心感谢。

本书列为南京师范大学品牌与特色专业建设计划项目。

编者

2002年10月

目 录

1 计算机仿真技术	(1)
1.1 电站仿真技术	(1)
1.2 电站仿真的数学模型	(7)
2 热电站仿真机	(20)
2.1 热电站仿真机计算机系统简介	(20)
2.2 热电站仿真机软件系统	(33)
3 锅炉及其运行	(48)
3.1 锅炉设备规范及燃料简要特性	(48)
3.2 锅炉启动	(62)
3.3 锅炉正常运行与调整	(72)
3.4 锅炉停运	(83)
3.5 制粉系统运行	(86)
3.6 锅炉事故处理	(94)
4 汽轮机及其运行	(114)
4.1 汽轮机及其热力系统	(114)
4.2 汽轮机启停概述	(136)
4.3 汽轮机的启动	(148)
4.4 汽轮机的停机	(160)
4.5 调整抽汽式汽轮机的运行	(166)
4.6 汽轮机组的正常运行与维护	(168)
4.7 汽轮机辅助设备的运行	(176)
4.8 汽轮机事故处理	(185)
复习思考题	(196)
参考文献	(200)

1 计算机仿真技术

1.1 电站仿真技术

1.1.1 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,最基本的内容应该相同,即模型必须反映系统的主要特征或本质特性。

在工程实际中仿真与模拟两词常常交叉使用。严格意义上,“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,而用另一个系统来表示它们的过程。“仿真”(emulation)是指用另一个物理系统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”。

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,变成一个仿真模型,然后在计算机上进行运转的过程,称为仿真。

系统仿真与一般在计算机上进行的计算是不同的,如热力计算、水力计算、强度计算、控制系统的计算等,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。

系统仿真并不限于调节系统,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。

如现有的“虚拟现实”技术,可在计算机上以三维图像模拟人体内部复杂的组织结构。外科医生在进行某种手术之前先在计算机模拟图像上“动刀”,取得一系列经验,在操作上有一定把握后再实施手术,这样可大大提高手术成功率,减少失误。又如化工过程的仿真,舰艇船舶操纵的仿真,飞行器的模拟训练装置,汽车、机车的驾驶操作仿真都是计算机仿真技术的一系列应用。

1.1.2 仿真技术在电厂中的应用

随着社会对能源需求的增长和发电技术的进步,促使高度自动化的火电机组迅速发展。因此,要求运行人员具有更高的技能、熟练的技巧和更广阔的知识。多数大容量的火电机组

主要担负电网基本负荷,启停次数甚少。高度自动化的倾向减少了运行人员干预的机会,甚至取消了运行人员的某些基本操作。这就使得对运行人员进行现场训练和教育的时间变得越来越长,且往往提高与收效甚微。美国联邦能源管理局(U. S. Federal Energy Administration)在“提高安全性的专题”报告中指出:“电厂的可靠性可以由改进设计和加强维护来改善,但它只占提高可靠性的 20%~30%,另外 70%~80%依靠运行人员。”为了有效地提高电厂运行人员的专业知识、操作技能、应变能力和熟练程度,从 20 世纪 60 年代开始,研究人员探索出采用脱离实际发电现场的实时仿真技术对运行人员进行培训。这就是实时仿真培训系统。实时仿真系统不仅在火电厂,同时也在核电、民用航空、化工、石化和军事技术领域得以迅速发展,至今已臻完善。

国内第一套火电站仿真装置是由清华大学于 20 世纪 70 年代研制并用于对 200MW 机组运行人员培训的原理型仿真机。以后山东石横电厂又进口了 300MW 机组的全仿真装置,该装置安装在北京电力专科学校。1996 年底,福建福州华能电厂投运了 350MW 火电机组的全工况实时仿真与多功能在线研究系统。该装置通过与参考机组联网运行,取得机组的实时运行参数,使模拟培训易于结合实际,同时也可以监测机组运行,进行故障分析,有利于提高机组的运行水平,有效地发挥计算机系统的功能。

由于电力系统管理层的重视,我国大型火电机组的仿真培训装置获得了较大的发展。据不完全统计,在建和投入运行的大型火电机组的仿真培训装置已近 100 套。各大电网、各省电力局的不同类型机组基本上都有相应的仿真培训装置与之对应。原电力部还专门规定 200MW 以上机组的运行人员必须经过仿真机培训。

火电机组仿真装置的仿真内容包括:模拟机组正常工况下和事故工况下的启、停过程,训练运行人员能熟练掌握在各种工况下的启、停操作和事故状态下正确分析、判断和处理各种事故的能力;也可以通过对不同运行方式的仿真试验,寻求优化运行方式,提供操作指导;还可以通过对不同系统控制方式的仿真试验,得出最佳控制参数和优化控制方式。目前国内生产的电站仿真机主要以培训运行人员为目的。国内制造厂商在配套的软件生产中,努力提高仿真机的模型稳态精度和动态模型的结构水平,达到一定的实时性和逼真度,以期扩大产品的适应范围。

1.1.3 电站仿真机的仿真范围与技术要求

大多数电站仿真装置的仿真范围、装置构成、技术要求、仿真功能可以归纳如下:

1) 仿真范围

仿真装置按生产流程进行仿真,从燃料制备到发电机、主变压器组为止,包括了炉、机、电、控制 4 大部分。与变压器连接的电网被视为无穷大电网,电网参数作为外部参数来设置。

(1) 锅炉:锅炉本体、燃烧与风烟系统、汽水系统、燃料制备系统和辅机系统等。

(2) 汽轮机:汽轮机本体、凝汽器与循环水系统、回热与疏水系统、除氧与给水系统、旁路系统、辅助蒸汽系统及油系统等。

(3) 电气:发电机本体、主变压器、励磁系统、厂用电系统和冷却系统等。

(4) 控制和保护:协调控制系统、电液调节系统、旁路控制系统、监控系统、联锁逻辑安全保护系统、单回路调节系统等。

2) 仿真装置硬件

常用的仿真培训系统可分为两类。一类是原理型的,其仿真操作盘台与生产现场的不一致,对现场的实际控制盘台进行了大量的简化,许多参数、报警信号都被显示在辅助显示台的 CRT 上。这类仿真装置投资较少,但真实性较差,属于一般通用型教育工具。另一类为全仿真型,其仿真操作盘台与现场控制盘台一致,显示仪表及操作开关的数目和位置都与实际控制盘台相一致,真实地再现了现场操作环境。此类仿真机由于盘台数目较多,因而投资较大,但真实性较强。随着计算机技术水平的发展,广泛采用了集散控制系统,使大型火发电机组的控制盘台数目有了大幅度地减少;仿真装置计算机系统的价格也有了较大幅度的降低。因此,全仿真型仿真系统被广泛采用。中小型机组,多采用常规仪表控制,此类机组的全仿真型仿真装置仍保留了大量的模拟控制盘台。

(1) 仿真计算机系统应采用通用计算机,允许直接存储器访问(DMA),优先级控制和实时中断处理。计算机应保证在满足规范规定的仿真功能以及高逼真度的条件下,还有 20% 冗余机时和 20% 的冗余内存空间。主计算机是仿真机的核心设备,其主要功能是进行仿真数学模型的运算。它与工程师站、就地操作站、辅助显示台及仿真控制盘台的数据通道接口组成一个局部网络。由于数学模型运算的任务十分繁重,20 世纪 70、80 年代的仿真设备主计算机系统常采用小型机或中型机。进入 90 年代,由于计算机技术的飞速发展,PC 机性能的不断提高,逐渐出现以 PC 机代替中、小型机作为主计算机的仿真培训装置。目前,一台高性能的 PC 机完全可以承担起数学模型运算的任务。

主计算机将数学模型的计算结果通过网络传向其他的站点,以便其他站点根据自己的任务对这些数据进行处理、显示、打印等。同时,也可以接收其他站点控制变化的返回,根据返回值的变化重新计算,然后将计算结果再发向各个站点。如此往复不已,使各个站点的数据库不断刷新,从而实现实时仿真。

(2) 仿真控制盘台是仿真机的重要组成部分,其与现场真实控制盘台的相似程度直接反映了仿真控制环境的逼真度。仿真仪表、开关的数目和位置应与现场仪表、开关数目和位置相一致。数据通道系统(又称 I/O 接口)是连接主计算机与仿真控制盘台的桥梁。主计算机通过网络适配器将数据传给 I/O 接口,I/O 接口将传来的数字信号转换成模拟信号,再将模拟信号传递给仿真控制盘台的仿真仪表。同时,也把仿真控制盘台上开关操作的信号转化成数字信号通过主计算机的网络适配器传给主计算机,以实现主计算机与仿真控制盘台之间的通信。

对于采用 DCS 的机组,运行人员的操作是在 DCS 操作员站上进行的。这种机组的仿真操作设备应为仿真操作员站,仿真操作员站的人机界面应与现场操作员站的人机界面一样。由于操作员站往往是 PC 机,与主计算机的通信十分方便,只需在 PC 机上装上网络适配器即可。这样不仅节省了仿真控制盘台(包括仿真仪表、开关)硬件设备,同时也节省了价格较贵的 I/O 接口设备,使仿真机的制造成本大为降低。

还有一些机组,不仅采用了 DCS,同时又保留了控制盘台。对于这种机组,考虑到仿真操作环境的逼真度,不仅要有 DCS 仿真操作员站,同时也应该设有仿真控制盘台。

仿真机 I/O 接口系统的输入、输出接口应该是商品化的通用组件,其精度和分辨率高于配套仪表设备的精度和分辨率。I/O 的传输速度应该达到从仿真控制盘台上观察到的仿真模型的响应过程与参考机组的响应过程在时间上没有明显差别。I/O 接口应有适量的备用。

(3) 终端 CRT 和打印机。

(4) 教练员站(指导员台)可控制仿真装置的运行,选择和组织培训项目,并监视学员的培训。教练员站是培训指导教师对整个仿真培训过程发出种种控制命令的指挥中心。通过它,指导教师可以选择各种运行工况、控制仿真进程、设置故障、调整仿真过程速度的快慢、进行数据存盘打印。就地操作站可以完成在控制室外的一些必要操作,如锅炉点火、开关疏水阀门等。

(5) 在电站机组实际运行过程中,为了保证机组的安全经济运行,操作人员总是希望能够尽可能多地了解机组各个部分的运行状况。但由于种种原因,现场监控的参数总是有限的,不可能对所有想要知道的参数都进行监视。而在仿真机上这一矛盾可以得到解决,这是由于所有的数据都是由主计算机计算出来的,因此,可以把所有数据都显示出来。这种用于显示详尽的机组运行参数的设备,我们称为辅助显示台。辅助显示台可以根据需要将某些数据分成组,以曲线、图形或表格的方式显示出来。这样,使受训学员能够更全面地了解机组运行的工况与机理。

(6) 环境仿真包括照明仿真、通信仿真、声响仿真等。

3) 仿真计算机系统软件

(1) 操作系统软件一般使用计算机厂家提供的操作系统软件,这种操作系统应当是实时、多任务、多用户的系统。

(2) 机组仿真软件是用高级语言编写,并设计成统一的、良好的文件格式。在程序设计中采用模块化的结构方式,这样在增加或删除某个模块时不会破坏总的程序结构。

机组仿真软件应使仿真装置的响应特性与参考机组差别不大。数学模型是决定仿真过程逼真度的关键技术之一,是仿真机的“灵魂”。数学模型的建立必须以物理过程为基础,并符合质量、能量和动量守恒定律。机组仿真软件应以参考机组的结构设计和热力计算为依据,建立稳态和暂态全过程的全仿真模型,直接或间接地受操作员监视和控制的设备或现象均应被仿真。

(3) 教练员站软件是实现教练员站培训控制功能所需要的全部软件。

(4) 仿真支撑软件是具有可以支撑仿真应用软件的开发、维护、修改、调试和实时运行功能和仿真数据管理功能的软件。

(5) 诊断和测试软件是包括在线或离线诊断仿真装置硬件故障的诊断软件,可以提供帮助检查或维护系统和设备的诊断程序,如图形格式转换工具软件、通信测试工具软件。

4) 仿真装置功能

(1) 机组正常运行工况和试验。机组正常运行工况的仿真至少包括:从各设备完全停运的冷态启动到带满负荷;机组从热备用启动到带满负荷;从汽轮机冲转到发电机同期并网;锅炉、汽轮机或整个机组跳闸后重新恢复到额定负荷;机组从 100% 负荷正常停机到热备用或冷态停用状态;运行人员对设备或系统进行规程规定的各种试验(如联锁试验和汽轮机阀门试验等)。

(2) 机组故障工况。仿真装置可实时地仿真非正常工况和突发事件(如锅炉爆管、凝汽器真空下跌等),这时机组和自动控制系统都能反映真实故障过程。仿真装置的故障可以由误操作自然引发,亦可由教练员插入。插入的故障可分为离散型和可变型两类。离散型故

障指设备处于某一特殊状态(如一个控制阀门因故障卡在全开、全关或某一位置)。可变型故障指设备、控制装置或生产过程的故障为一可变状态,其严重程度应是可调整的(如热交换器的污垢、敏感元件的信号漂移等)。故障发生后,仿真装置的动态反应应与实际机组故障时的动态反应一致,或与根据运行经验、工程分析所得到的估计动态反应相符合。运行人员可通过操作缓和、消除故障的影响或恢复机组正常运行,如处理不当,可能引起事故扩大。

(3) 仿真装置运行极限。仿真装置只限于在机组设计的运行极限范围内工作。为此,当某些参数值的变化将要超出运行极限时,应向教练员发出报警。

5) 培训环境要求

控制室盘台。控制室盘台上应装置有进行监视和操作所必需的操作器、仪表、开关、光字牌、CRT 监视器和其他人机界面设备,以便受训人员进行机组正常运行和故障处理。仿真装置控制室盘台的设计应在布置位置、尺寸、形状、颜色和动作功能等方面尽量与参考机组相同,其差异不能影响培训。

6) 培训控制功能

(1) 教练员站功能。教练员站是教练员和仿真装置的接口,用来控制仿真装置的运行。控制方式主要有:

①工况选择。从预定的初始条件中选择并设置一个初始工况进入可培训状态。

②冻结。可在任一时刻冻结全部动态过程,暂停运行。

③故障。插入或消除故障状态。

④改变外部参数。

⑤进行就地操作。

⑥返回。能连续地记录仿真状态数据,以便返回到过去某个时刻的状态。

⑦记录和重演。能连续记录控制盘台上的操作,以便重演过去的过程。

⑧快存。在培训过程中,可快速存储任一时刻的特定工况,以便将来作为初始条件选择调用。

⑨慢速。可以用小于实时的速度运行。

⑩快速。对于时间常数较大的缓慢变化过程,例如锅炉上水、凝汽器抽真空、暖机等,运行速度可以加快。

⑪学员培训情况评价。备有有关参数的监视和记录系统,并能客观地评价培训情况。

⑫机组参数监视。可以组合和显示动态运行数据。

(2) 初始条件。仿真装置能存储根据培训要求而决定的初始条件,即仿真培训进程开始时仿真数学模型全部变量的初值。在培训过程中通过指导员台选择初始条件。根据需要仿真装置应能增加、修改或取消一些初始条件。初始条件的存储应考虑适当备用。

1.1.4 几种典型的电站仿真机系统

下面介绍几套国内典型的仿真机组情况。

1) 某 300MW 机组全仿真模拟培训装置。用来对火电厂大机组运行人员作全面系统的培训,可供集控专业的学生进行运行实习。模拟培训装置主要由下列几部分组成:

(1) 主控制室。室内布置与石横发电厂 300MW 机组的主控制室完全相同,装有锅炉

盘、汽轮机盘、发电机盘、辅助盘和网控盘。学员在控制室的视听感觉如同真实电厂一样。

(2) 指导员台。主要实现机组运行状态的启、停和冻结。机组运行速度的选择分为正常、快速和慢速 3 种模拟方式。初始状态选择可设置 99 种初始工况。可返回重演 4h 之内的训练内容,便于运行分析。故障设置可模拟 229 项故障,故障程度可调,并可组合设置故障。外部参数设置可以改变 50 种影响运行工况的外界因素,如煤种、大气温度等。

(3) 就地操作台。控制室以外的就地操作在就地操作台进行。

(4) 计算机系统。配有 CONCEPT 32/6750 计算机两台。

(5) 采用分布式 I/O 系统。全部输入、输出量 5250 点,扫描周期为 0.05s,通道传输速度满足实时要求。

(6) 电站仿真软件。建立连续全物理过程的数学模型,用 FORTRAN 语言编写,在模拟机上操作不论正确与否,均与被模拟的电站有同样的响应。

2) 华北电力大学 STAR-90 仿真技术,具有功能强大的支持系统和高精度全物理过程模块化数学模型,为用户进行各种电厂系统的分析、研究提供了优良的环境。

该仿真机系统为用户选用了高档超级小型机系统,用户拥有近 50% 的 CPU 时间与内外存资源冗余,可以在仿真培训或仿真研究的同时,在后台进行各种语言环境下的计算机应用研究。

该仿真机系统计算机硬件,选用美国并行公司 3200 系列,美国 DEC 公司 VAX 系列等超级小型机。接口系统为 STAR-90 分布式、点对点通信、智能化接口,分散布置在仿真机 BTG 盘台后的门扇上。接口板通过 RS232 标准通信电缆与主机相连。每块接口板以微处理机技术为基础,处理多路信号,大大节省主机资源。点对点通信方式可以使若某一块板发生故障不会对整个系统产生严重影响。

该仿真机系统支持在线模块化建模、修改、调试、扩充全物理过程模块化数学模型。精确模拟电厂的全工况静态、动态行为,具有灵活、丰富、方便的指导员台功能。全面实现了对电厂计算机监控系统(DCS)的仿真。

3) 珠海某仿真技术研究所开发的基于 Transputer 并行计算机的火电厂仿真技术,已成功用于某厂 300MW 燃煤机组的仿真机上。

该仿真模型共用了 2000 个 FORTRAN 子程序模块,选用带 8M RAM 的 IMS T805-25 型 Transputer 计算板;仿真周期为 100ms,仿真计算机尚有 50% 的冗余;开发并应用了我国第一套面向对象的支撑软件系统 PROSIMS。该支撑软件系统建立在高性能并行计算机 Transputer 硬件及其软件环境基础上,吸取国外先进的支撑软件,如 ROSE、GEPURS、MMS 等软件结构、系统功能和高精度对象模型库等方面的优点,而对操作系统无紧密依赖关系,能方便地移植于任何操作系统之下。

4) 清华大学研制的某仿真机系统,模拟 200MW 火电机组在单元控制室内的全部操作设备及监视仪表。它以国产 200MW 机组为原型,从制粉系统至发电机变压器组对炉、机、电及自动控制系统进行仿真。

在系统硬件、软件支持下,全工况数学模型实现了对 200MW 火电机组从通汽、点火、升温、升压、暖机、并网、升负荷以及正常运行、停机和各种事故现象的全方位、全过程仿真。仿真系统操作性能好、功能完备。

仿真系统硬件由计算机系统、I/O 接口系统、控制盘台、指导员操作台、就地操作站、计

算机监测装置、音响装置等组成。

计算机主机采用 DEG 公司的 ECLIPSE MV/2500DC 微型化超级小型机,字长为 32bit,内存为 8MB,速度为 1.6MIPS,硬盘为 320MB,磁带机为 21MB 盒式磁带机。

I/O 接口系统采用了分布式智能化接口结构。主机与智能接口之间采用标准的 RS 接口通信,通信速率为 19.2Kbit/s,最远传送距离为 1 000m。

值得指出的是,随着计算机技术的迅速发展,以上仿真机系统中采用的小型机,其功能只要选用现在的微型机已足够实现。现在已有采用微型计算机或微型计算机局域网构成的仿真机计算机系统,大大提高了仿真机的性能价格比,并降低了仿真机的造价。

1.2 电站仿真的数学模型

1.2.1 系统及其性质

1) 系统的定义和特性

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) 系统具有一定功能。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。特性不同,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,构成了发电厂的动力循环。

(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。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。有时某系统的内部结构不一定是“能观”的,或由于某种原因,内部太复杂而我们只关心其输入输出之间的关系。在这样的情况下,也不必将系统内部结构表达得纤毫毕现。

(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、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。

(6) 系统又是可分解的。系统可分解成子系统,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。边界一经确定,也就确定了研究问题的范围和深度。

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,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深入了解,才能使系统分析富有成效。

2) 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,即当系统的状态是随时间连续变化的,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,则这种系统称为非连续系统。在实际过程中,完全是连续的或完全是非连续的系统是难以找到的。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,其转折点则是非连续的。

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。这些行为均可视为“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,这种系统称为离散系统。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。

3) 热工系统的性质

一般来说,热工对象特点之一是对象常为庞然大物,占据广阔的空间。特点之二是过程进行的有快有慢,惯性有的很小,有的很大。特点之三是有关的物理现象种类较多,从简单的机械运动到各种热学现象和能质迁移等等。总而言之,若把各种调节器及测量元件除外,则热工对象本身大致可分为4种环节和2类现象。

(1) 分布参数环节。较长的管道及管式热交换器,如蒸汽过热器等都属于此类。在此类环节中设备及介质的热工状态参数不但是时间,而且也是空间的函数。在复杂形状的对象中则还可能是二维,乃至三维空间的函数。此类环节的状态方程应由偏微分方程组来描述。在系统模拟研究中对于分布参数环节常要求进行近似简化处理。

(2) 集中参数环节。有集中容积的对象属于此类。如锅炉汽包、凝汽器、喷水减温器的空间容积及压力特性和转动机械的转动惯量等都可以列于此类。

此类环节的特点是设备及工作介质的热工状态参数可以相当准确地用某一点的参数来代表,因而其状态方程完全可由常微分方程组描述,即只是时间的函数。此类环节中通常有较大的质量及能量的储存。

(3) 特殊环节。有一类环节中的质量、能量储存相对来说其变化较小,其结构上也较紧凑,但各有其独特的工作特性。如汽轮发电机、风机、水泵以及燃烧室(主要考虑其传热特性),此种环节的惯性较小,或在所考虑的范围内惯性近于常数。它们的热工特性在数学模型中常以代数方程组的形式出现。

(4) 纯迟延环节。管内压力扰动的传播、热惯性较小的传输管道中的流动、皮带给煤机等传输机械属于迟延环节。

(5) 缓慢的能量迁移及质量迁移现象。热量及质量的迁移及相应的温度场及浓度场的变化在很多的情况下是一些甚为缓慢的现象。如在长度很大的管式热交换器中介质温度由入口到出口的变化;在大质量厚壁部件中如汽包壁、厚壁联箱、高压汽轮机的汽缸及转子受热或冷却的不稳定热传导下的温度场的变化,长距离输气管道中贮气容积及气体压力的变化等都属于此类。其时间常数的数量级可由数十秒到若干分钟不等。换句话说,这是一些惯性较大的过程。

(6) 相对快速达到平衡的现象。在不可压缩介质及处于饱和状态下的汽液两相混合介质中,压力变化的传播可以认为具有足够快的速度(声速)。而且,在压力变化不大时,一些可压缩介质也常按不可压缩情况处理,因而属于相对快速平衡的现象。例如,短管道中的介质压力变化等就是如此。一些热机的工作状态的改变因其惯性很小也属于此类。在以“秒(s)”以至于“10s”为时间单位的热工过渡过程中,这些快速平衡现象的处理比较简便,常可用代数方程组来描述。

这种划分,对于合理解决复杂热工系统的动态研究有其现实意义。若重点研究慢过程,则有关快过程可用其静特性方程组描述。若主要目标是研究快过程,则慢过程的变化常可略去。而若两者都是研究的目标,则可组成不同的通道或子系统,或使用有关的数学方法,如求解 Stiff 方程组的各种方法以及其他模型分解、模型简化的方法等。

1.2.2 数学模型

1) 系统仿真的整个过程

(1) 根据系统研究的目的和范围,建立系统的数学模型。确定仿真机计算机系统结构、I/O 接口型式、BTG 盘台设计等。

(2) 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,确认程序正确后在仿真机上进行运转。

(5) 对仿真结果进行分析、评价。

2) 建立系统模型的任务

计算机仿真以数学模型为基础的。被仿真系统的数学模型,是用来指导对该系统进行研究的。对于大多数的研究目的,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惟一的。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。

3) 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。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。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。当研究系统的静态特性时,系统特性是用变量间相互有关的函数式来表示的。当研究系统的动态特性时,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,它们都代表了系统的属性,反映了系统内部有关信息的联系,所区别的只是研究问题的方法不同。

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模型,而当我们研究的是采样系统等离散系统时,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。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。在研究同一系统时,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。它又可以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,应用分析法仅能对部分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,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了广泛的应用。

4) 模型的特点

在仿真过程中,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,其建模工作非常复杂。

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、作功等,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,而应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与实际过程一致。

(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,是由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、进汽量与汽轮机功率(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性。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) 时间常数的差别。在发电厂动力循环中,各设备的动态特性不同,其时间常数的差别十分悬殊。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,因蒸汽工况变化较慢又可近似地认为在短时间内没有发生变化等。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。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仿真的。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。汽轮机的调速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,解决动力循环的种种问题。

1.2.3 电厂仿真的主要数学模型举例

1) 锅炉数学模型的特点

(1) 锅炉是一种体积庞大、系统复杂的能量转换设备。在锅炉运行中,有燃料的化学反应,工质与能量的释放与贮存,工质的循环流动和能量的传递等。对其中的各个过程或者用数学公式来描述,或者用经验公式、表格、图形来表明状态参数之间的关系。所有的理论公式、经验公式、试验曲线和数据表格等,均属于锅炉的数学模型。完整的锅炉数学模型就是由这些数学关系综合而成。它描述了锅炉系统的各个输入、输出变量之间主要的数学关系。

它可以在计算机上求解,并反映出实际系统的运行情况。

锅炉运行时,如果输入与输出的物质和能量保持不变,而且处于平衡状态,那么锅炉内部各处烟气和工质的流量和参数以及锅炉本体各处的金属温度都能保持稳定。在一定工况下,各种稳态参数都有一定的数值,与前后的历程无关。这些参数的数值可以实际测定,也可由热力学、水动力学、气体动力学等静态计算求出。改变以后的稳态值也可通过静态计算求出。因此在不同的稳定工况下,各种状态参数之间总存在某种特定的关系,这些关系可用公式、图线、表格等数学形式来表达,从而构成仿真对象的静态数学模型。

在工况变动的过程中,或者说在不稳定状态下,哪些参数会发生变化?它们的变化速度和历程又是如何?这些问题都属于动态问题。动态数学模型就是用来描述系统或过程在不稳定状态下,各种参数随时间变化的数学关系式。这些数学关系式,一方面服从物理与化学的基本定律,另一方面也取决于系统的结构特点和初始工作条件。从理论上讲,由动态数学模型决定的所有参数的最终稳态值应该与静态数学模型所决定的完全一样,因此,两种模型也就统一起来了。

锅炉在实际运行时,绝对稳定和绝对平衡的状态几乎是没有的。因为锅炉经常受到各种因素如内部的或外部的干扰,在一个动态过程尚未结束时,往往又来一个干扰。随着锅炉容量的增大和热力参数的提高,其构造更加复杂,对外扰及内扰也更为敏感,同时对运行调节方面也提出了更高的要求。因此,对于现代锅炉,所谓数学模型,主要是指建立动态模型。

(2) 锅炉本身占很大的空间,其中包括处于不同热力学状态的几种介质,并且各处参数都不同,即绝大部分参数都是三维空间的函数,具有明显的分布参数特点。其数学模型十分复杂,往往是非线性的。因此,在静态计算中,通常采用分区集总的办法,对每个区域内的各种参数分别用平均值来代表,也就是简化为集总参数模型。由于把整个通道中的介质分成了若干区段,所以对整个锅炉来说,仍带有分布参数的特点。在动态模型中对某一区段内的一种或几种参数,有时也按分布参数来处理,但认为同一通道横截面上的参数是均匀的,只是沿着工质的流向发生变化。这就将三维空间的分布参数简化为一维分布参数。集总参数动态模型是时间变量的常微分方程组,而一维分布参数的动态模型是含有两个自变量(距离和时间)的偏微分方程组。

(3) 工作过程复杂。在锅炉内部有几种不同性质和不同状态的介质,如风、烟、汽、水、燃料和灰渣等。它们同时发生多种化学反应和物理过程,如燃烧、传热、水动力、气体动力、制粉和热化学等。各种过程间还存在交叉影响。如果将所有因素不分主次全部包含在数学模型中,将会使问题大大复杂化而且无此必要。锅炉的动态模型一般仅研究压力、温度和流量等热力学参数的变化过程。至于锅炉内部其他一些极复杂的工作过程,如汽包中的汽水分离过程、汽管道内的两相流动过程以及煤粉管道内的汽固两相流动过程等,在建立锅炉模型时,只能宏观上加以反映,并作出必要的简化。

(4) 不同的动态过程,时间常数差别很大。锅炉内各物理现象动态过程的速度相差很大。如在同一汽水流程中,压力侧较快,而在汽水侧则较慢。对于这些快慢差别很大的变化过程,在动态仿真中一般都分别处理,例如分成流量模块和传热模块处理。

(5) 多变量和多回路。锅炉有许多输入量和操作量,如燃料量、给水量、减温水量、燃烧器倾斜角度、送风机和引风机的挡板开度、烟气再循环挡板开度等。也有许多输出量,如汽水侧和烟气侧各点的压力、温度和流量等。上述输入和输出量之间的联系是密切相关且相