

电厂系统仿真技术的发展

吕崇德, 薛亚丽

清华大学热能工程系, 北京 100084

[摘要] 首先对国内外电力工业仿真技术和培训用仿真机的发展历史和现状进行了概述, 其中重点论述了国内电力工业仿真技术的先进性和仿真机数量位居世界第一的现实; 其次进一步阐述了仿真建模理论和学科发展对提高仿真技术的重要性, 以及我国有关电力工业建模技术的部分研究成果; 最后指出了我国电力工业仿真技术的发展趋向。

[关键词] 仿真; 电厂系统仿真; 图形化建模; 仿真机

[中图分类号] TP391.9

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)08-0005-06

Development of Power Plant Simulation Technology

LU Chongde, XUE Yali

Thermal Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstracts: This paper first summarizes the development and the state-of-the-art of the power plant simulation technology and training simulators in the world, with focus on the progress of China's power plant simulation technology, where the number of simulators ranks the first in the world. Then the modeling theory and the related development are discussed with respect to its importance in improving the simulation technology, and are followed up with some research results of power plant simulation technologies in China. The future directions of the power plant simulation in China are pointed out at the end.

Key Words: simulation; power plant simulation; graphic modeling; simulator

CLC Number: TP391.9

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)08-0005-06

0 引言

仿真技术和仿真科学是建立在计算机技术和数学模型基础上的一门新兴科学。早在 20 世纪 50 年代, 采用运算放大器的电子模拟式电路 (Analog Computer) 刚刚出现, 就被立即应用于核电培训仿真机的研究工作中。但是, 一方面模拟式电路的不稳定性使得仿真精度很低, 另一方面运算放大器的阶数受技术条件的限制, 以及难以对机理建模的非线性大规模偏微分方程进行实时运算, 从而达不到对生产过程中正确处理事故的仿真及实时培训的目的。因此在电力工业中, 真正实用性仿真机的研究和开发始于 20 世纪 60 年代数字式电子计算机 (Digital Computer) 被采用之后。随着电子计算机的发展、使用和建模技术水平的不断提高, 核电和火电仿真机也相应地得到了迅速发展。

1 国外电厂仿真技术及仿真机发展概况

各国的电力工业历来把安全运行作为行业的首要技术指标。电力生产和传输过程的任何故障都将大面积地影响辖区内的生产和生活, 因此很多国家 (例如美国、加拿大、日本和中国) 规定电力工业的运行操作人员必须经过严格的训练之后, 才允许值班和上岗操作。特别是 20 世纪 70 年代之后, 因核电站运行人员误操作引发过严重事故, 使得培训工作变得更为突出。美国能源部于 1975 年 3 月提出的“安全性专题报告”中认为: “电厂的可靠性可以由改善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% 依靠于运行人员。”美国核安全信息中心统计显示: 沸水堆事故的 1/8、压水堆事故的 1/6 是由操作人员造成的。

收稿日期: 2007-03-10

作者简介: 吕崇德, 男, 北京市海淀区清华大学热能工程系, 教授, 研究方向为电站系统仿真、热工测量和自动控制;

E-mail: lcd-dte@mail.tsinghua.edu.cn

为了培养操作运行人员,1968–1973 年的 5 年时间里,当时美国最大的 4 家动力集团公司相继建立了各自的首个仿真培训中心。1968 年,通用电气公司建立了世界上第一台完全复制 800 MW 沸水堆控制室仿真机;1970 年,B&W 公司建立了 913 MW 沸水堆蒸汽发生器系统仿真机;1972 年西屋(Westing House)电气公司建成 1 100 MW 的压水堆仿真机;1973 年,CE(Combustion Engineering)公司建立了 880 MW 压水堆仿真机。这 4 家动力公司建立核电仿真机的目的是为购买其核电设备建立发电厂的客户培训运行操作人员。之后,1977 年美国在 TVA(Tennessee Valley Agency)建立了第一台火电仿真机。

1973 年,法国建立了第一个火电仿真培训中心;1976 年,日本关西电力公司建立火电培训中心,安装了两台仿真机,仿真的发电设备容量分别为 250 MW 和 450 MW。1978 年之前,世界上共建成 52 台电站仿真机,都是用于培训运行操作人员的,其中核电 35 台、火电 17 台。

1979 年 3 月,著名的美国三哩岛核电站核泄漏事故为电力工业仿真技术敲起了警钟。调查委员会对于这次重大的核泄漏事故提出的结论之一是:三哩岛事件的深刻教训是操作员的培训很不充分,只在不甚了解电厂生产管理过程的锅炉制造厂的仿真机上培训,没有先进的、能仿真各种水动力学,特别是能仿真两相现象动态过程的仿真器上进行培训。因此,调查委员会提出每个电力公司应有完全仿真电厂控制室的仿真机。操作人员和管理人员应在该仿真机上进行培训,并且保证培训的高度真实性,应包括所涉及的动态过程。1981 年,美国即制定了核电仿真机的规范——“核电站人员培训和资格证书(ANSI/ANS-3.1-1981)”,1985 年修改为“用于操作人员培训的美国家标准核电仿真器(ANSI/ANS-3.5-1985)”。1990 年,制定了火电厂仿真机规范 ISA-77.20,1993 年修订为 ISA-77.20-1993。

三哩岛事件调查委员会明确指出,事故的根本问题是生产人员在制造厂的仿真机上进行培训,而制造厂的仿真机开发人员缺乏电站运行知识,所以“仿真机对对象动态过程的模拟是不完善的,仿真培训未包括多种事故下操作人员的训练,不能模拟操作人员可能遇到的事故,例如不能仿真当反应堆冷却压力下降时的压力容器水位增高。”

自此,原有仿真机的数学模型基本不能再使用,一种新结构的、具有高精度数学模型的、能完全复制发电厂控制室的仿真机被研发出来。至 1988 年,美国建成约 100 台核电和 50 台火电仿真机;加拿大建成 22 台核电仿真机和 9 台火电仿真机;日本建成 11 台核电仿真机和 17 台火电仿真机;全世界总共已有 250 台仿真机,其中火电仿真机 78 台。

20 世纪 90 年代,由于发达国家劳动密集型企业,特别是用电量大的制造业外迁至发展中国家,使发达国家国内用电量减少,电力工业发展缓慢,仿真机的研发也几乎陷于停顿状态。前述美国 4 大动力集团的仿真公司无一例外地被关闭。以美国曾经较大的仿真公司 Singer-Link 公司和 GPI (General Physics International Engineering and Simulation) 公司为例,1979–1988 年它们建立的核电仿真机为 41 台,其中 36 台安装在美国各电力公司,只有 5 台是为其他国家生产的。即从 1979 年开始的 10 年里,大部分仿真机是为美国本国建立的,而且数量相当可观。实际上这些仿真机是三哩岛事件后用来取代不合格的老仿真机而开发的。90 年代初,这两家公司合并为 S3T(S3 Technologies)公司。在 1989–1997 年期间,它们只生产了两台火电仿真机,一台是台湾的,另一台是韩国的;在同一时期,生产了 32 台核电仿真机,11 台是美国的,21 台是国外的,其中包括德国 10 台、韩国 3 台。可以看出,1989 年之后,德国大量从美国引进核电仿真机,因为此前德国的仿真机比较少,表明它采用仿真机对人员进行培训比美国、日本滞后一段时间。21 世纪,西方的电力工业趋于饱和,仿真机的市场重点也转移到亚洲地区^[1]。

2 我国电站仿真技术和仿真机发展历程

2.1 自主研发仿真机

总体而言,我国的电厂仿真技术研究起步较早,成果显著^[1]。早在 1975 年,原水利电力工业部支持清华大学研制“大型火电机组仿真系统”,并指定以 200 MW 燃煤发电机组作为仿真对象。该系统于 1982 年研制成功,中国成为当时世界上少数有能力建立仿真机的国家之一。这项研究成果获得 1983 年电力工业部优秀科技成果一等奖和 1985 年国家科学技术进步一等奖,被电力部门誉为中国电力培训的里程碑。清华大学成立的中国第一个火电运行培训中心,在 5 年时间里为电力部门培训了约 2 000 名运行技术人员。1984 年,清华大学开始研发中国第一台完全复制电厂控制室的全范围高逼真度仿真机,于 1988 年完成,安装在东北电管局沈阳电力高等专科学校。这是中国自己成功研制的最早的两台实用性火电仿真机,见图 1 和图 2。

1988 年,清华大学对仿真机的培训效果进行了对比调查。结果是某电厂未经过仿真培训的一组运行人员在 200 MW 燃煤机组上连续运行 18 个月,期间出现事故 7 次,其中 6 次因不能正确处理而被迫停机,停机时间最长的达 15 d 之久,并且有 1 次事故造成人员受伤;调查的另一个电厂,在同类机组上由参加过仿真培训的人员运行 10 个月,发生了 4 次甩负荷事故,经炉、机、电运行人员互相配合,均能正确处理和消除事故,没有影响生产。在调查中,还有一个电厂的运行人员,也是在



图 1 清华大学研制的我国首台火电仿真系统
Fig. 1 The first power plant simulation system in China, developed by Tsinghua University



图 2 清华大学研制的我国首台全范围仿真机控制室
Fig. 2 Control room of the first full-scale simulator in China, developed by Tsinghua University

200 MW 机组上运行,11 个月内发生事故 5 次,包括保护动作、甩负荷、锅炉灭火等较大事故,同样是由经过仿真培训的运行人员进行操作的,结果有 4 次很快就消除了事故,10 min 内恢复了正常生产。这些统计和调查资料说明,仿真技术对于电力生产的安全起着至关重要的作用^[2],因此电力工业把仿真技术称为技术进步的标志之一。仿真培训的经济效益也非常可观,由经过培训的人员操作一台 600 MW 的机组,如果能够减少 24 h 事故停机,所产生的直接经济效益约为 1 000 万元;如果考虑到国民生产的经济损失,产生的经济效益将达 6 000 万元之巨。

鉴于仿真培训的重要性和必要性,我国自 1988 年规定:200 MW 以上机组的主要运行岗位人员在上岗前必须先仿真机上进行为期不少于 1 个月的培训。培训不合格者不得上岗。对于已投入生产的 200 MW 以上的发电机组主要岗位运行人员也要逐渐做到定期上仿真机轮训和反事故演习,并以此作为对运行人员的

重要考核内容。

由于清华大学在电厂仿真技术和仿真机开发上取得的成果,推动了我国电力工业的技术进步,1995 年获得国际仿真学会颁发的突出贡献奖,这是北美以外唯一的获奖者。

2.2 引进和出口的仿真机

在 20 世纪 80 年代,我国也引进了几台国外研制的电厂仿真机。如 1986 年国家核安全局从美国引进了一台 900 MW 压水堆核电仿真机,安装在清华大学,一台 550 MW 原理型火电仿真机,安装在华北电力大学(原华北电力学院);1987 年随华能大连电厂主设备从日本引进了一台 350 MW 火电仿真机,安装在大连电力技校;1988 年从美国引进了一台 300 MW 火电全范围仿真机,安装在北京电力高等专科学校(原北京电力学校)。引进的仿真机价格十分昂贵,高者达 670 万美元,大量引进国力难以承受,而且因为多数拥有者没有维护能力,设备不能正常使用,现在已经全部报废。

此后,我国完全依靠国内的技术力量自主发展火电站仿真机。除了计算机设备依靠世界市场之外,在其他核心技术方面,如建模和支撑平台,完全是自主研发的。例如,清华大学开发的面向对象的图形化建模支撑软件平台,包括了相应的模块库、资源库、独特的热力系统流体网络算法、电气网络算法、控制逻辑算法,以及系统管理等组态工具软件。该系统具有高度的开放性、完全面向对象的模式、便捷的实例化方法、强大的调试手段、文档自动生成发布及查询等功能。

由于我国电力仿真技术成熟先进、开发时间短且价格低廉,自从 1988 年以来近 20 年没有再从国外进口火电仿真机。与此同时,我国还出口了仿真机和仿真软件,1995 年清华大学成功地向巴基斯坦出口了 210 MW 仿真机(如图 3);1996 年向韩国出口了仿真支撑软件平台及建模技术。

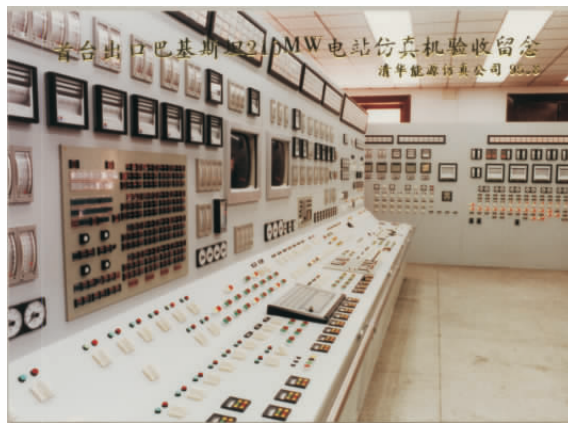


图 3 出口巴基斯坦的 210 MW 火电仿真机
Fig. 3 210 MW power plant simulator exported to Pakistan

2.3 近年发展概况

1986-1997 年我国拥有火电、核电、水电等各种仿真机 78 台,成为世界上仅次于美国的第二大电力工业仿真机拥有国。其中火电仿真机占 68 台,数量居世界第一位,显示了中国强大的仿真技术和仿真机开发实力。除西藏、海南外,各省市电力工业公司都建立了各自的电厂仿真培训中心,拥有或规划建成 200~600 MW 各种规格型号的火电培训仿真机。另外,还有不少发电厂单独拥有自己使用的仿真机。

就在西方发达国家电力工业发展缓慢之际,我国的电力工业发展迅猛异常,“十五”期间平均每年新装发电机组容量约 27 GW,其中燃煤电站占 22 GW,为装机总量的 80%。而 2006 年一年的装机容量为 102 GW,相当于美国加利福尼亚州装机总量的两倍。虽然 2006 年的电力发展过高而较不正常,但是可以说明为了打破电力垄断,自 1998 年我国电力工业体制改革至今,新建电厂有着更加快速的良好发展态势。

迄今为止,全国约 500 GW 发电机组中火电机组约为 400 GW。仅以 2006 年新装机容量 102 GW 为例,按原能源部计划的 1 200 MW 大型电厂(即 4×300 MW 或 2×600 MW)可以设置一套仿真系统,2006 年可能需要 85 台仿真机。这种情况必然带动我国电力仿真机、仿真技术和学科更为迅速地发展。

粗略统计,目前我国电站已经使用和正在研发的培训仿真机约 400 台,远远超过世界上任何国家的仿真机拥有量。其中清华大学能源仿真公司和同方电子公司研发了 148 台,数量居国内首位。

3 电力工业仿真系统及建模理论

电力培训仿真机的硬件系统由一台计算机工作站和多台微机组成,由局域网链接成为一个独立的系统,用以模拟发电厂控制室的运行操作和监控设备,它是仿真的基础设施,系统结构如图 4 所示。随着计算机技术的发展,这些设备已经变得比较易得且廉价。

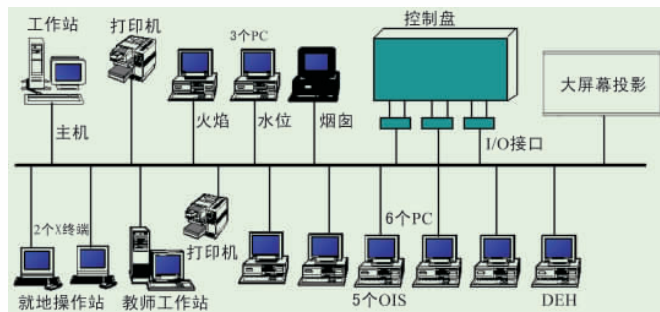


图 4 火电机组仿真机硬件系统结构示意图

Fig. 4 Hardware system diagram of fossil power plant simulator

仿真机的核心技术是建立被仿真对象的数学模型和支撑软件。先进的建模技术既能够保证仿真的高精度和实时性,也能够缩短仿真机开发时间。

建模技术是指如何建立适用于被仿真电站机组的数学模型。用于培训的仿真机数学模型与控制系统研究、工程分析等使用的数学模型有所不同。为了满足仿真精度的需要,培训仿真机采用的模型是根据质量、能量和动量三大守恒定律所建立的机理数学模型。这种机理数学模型也有各种不同的表示形式,复杂些的可以是偏微分方程,简化些的可以是微分方程,甚至代数方程,视仿真精度的要求取舍。下面给出微分方程的基本形式。

质量守恒方程为

$$V \frac{d\rho}{dt} = \Delta G + G_L \quad (1)$$

动量守恒方程为

$$\rho L \frac{du}{dt} = P_1 - P_2 + H - f \quad (2)$$

能量守恒方程为

$$Q + q_1 h_1 - q_2 h_2 = \frac{d}{dt} [(V\rho + mc/c_p)h] \quad (3)$$

式中(把所研究的某设备、部件、管段等简称为对象), V 是对象的容积; ρ 是工质的密度; G 是流入流出对象的工质流量; G_L 是流量的泄漏量; u 是工质流动速度; P_1 , P_2 是对象的进、出口压力; H 是压头; f 是流动阻力; Q 是传入、传出工质的热量; q_1, q_2 是出、入口处的工质流量; c_p 是工质比定压热容; m, c 是金属质量和比热容; h_1, h_2 , h 是进、出口工质的焓和平均焓。

大型火电机组的数学模型包括热力系统和电气系统的全过程,如火电厂的锅炉本体模型或核电站的蒸汽发生器模型、汽轮机模型、发电机本体模型、控制系统模型及各种辅机和辅助系统模型。从系统本身的复杂性和工程应用的要求来看,最关键的建模技术是锅炉或蒸汽发生器模型,多年来国内外有关热力建模理论的研究也大多集中于此。锅炉本体又可分解为多个子系统,如汽水系统、水冷壁传热系统、燃烧系统、风烟系统、尾部受热面系统、除尘和脱硫系统等。其中,汽水系统建模具有典型性,它是典型的单相受热管段。这类对象的每个工业流程往往形成流体网络的结构形式,通常把流体网络按一定规范要求简化为一定数量的节点和支路,再利用质量和动量守恒方程求解各个节点的压力和各条支路工质的流量。能量守恒方程反映对象的传热和传质过程,具有大惯性非线性的分布参数特性,因此采用分布参数模型最为合理。

分布参数模型是以偏微分方程为主的方程组表示,可以对它直接数值求解,所得的数值解具有很高的精确度,可以作为标准解。但其计算量甚大,难以满足实时仿

真的要求,因而仿真机上极少采用。在实时仿真中,对单相受热面类的对象最常使用的建模方法是采用集总参数模型。

但对像锅炉的省煤器、过热器、再热器等具有典型分布参数特性的对象来说,集总参数存在模型动态精度差、不能正确反映出热工对象的分布参数特性等严重缺陷。随着工程分析、工程设计研究的需要及计算机运算能力的加强,对模型精度提出更高的要求。近几年来研究出了各种改进的集总参数数学模型,使其更加逼近分布参数特性,以满足各种不同的使用场合^[3-4]。

在开发仿真机时,最初的建模方式是直接对大量的微分方程按欧拉方程进行离散化、编程和求解。一台 600 MW 的机组,大约由 3 000 个微分方程和 30 000 个

代数方程组成,如果采用直接编程求解,将存在难以克服的困难并有可能出现大量错误。因此,面向对象的图形化和模块化建模技术的研究近年来逐渐完善^[5]。火电厂主要由锅炉、蒸汽轮机、发电机,以及大量换热器、阀门、水泵、风机、管道等设备组成,因此可以设备为单元,划分成设备模块。设备模块中包含设备的结构参数、流体形态、工质参数等,在建模过程中,调用相关设备模块组成一个热力子系统,诸多子系统组合为大的设备或系统。图 5 为一个图形化模块建模示例,输入工质和设备诸参数之后,将自动进行流体网络计算,可以得出所需实时输出参数。实际上,每一个系统就是一个流体网络,它是模块化建模的一个重要组成部分,因而如何求解流体网络便成为很多学者研究的对象^[6]。

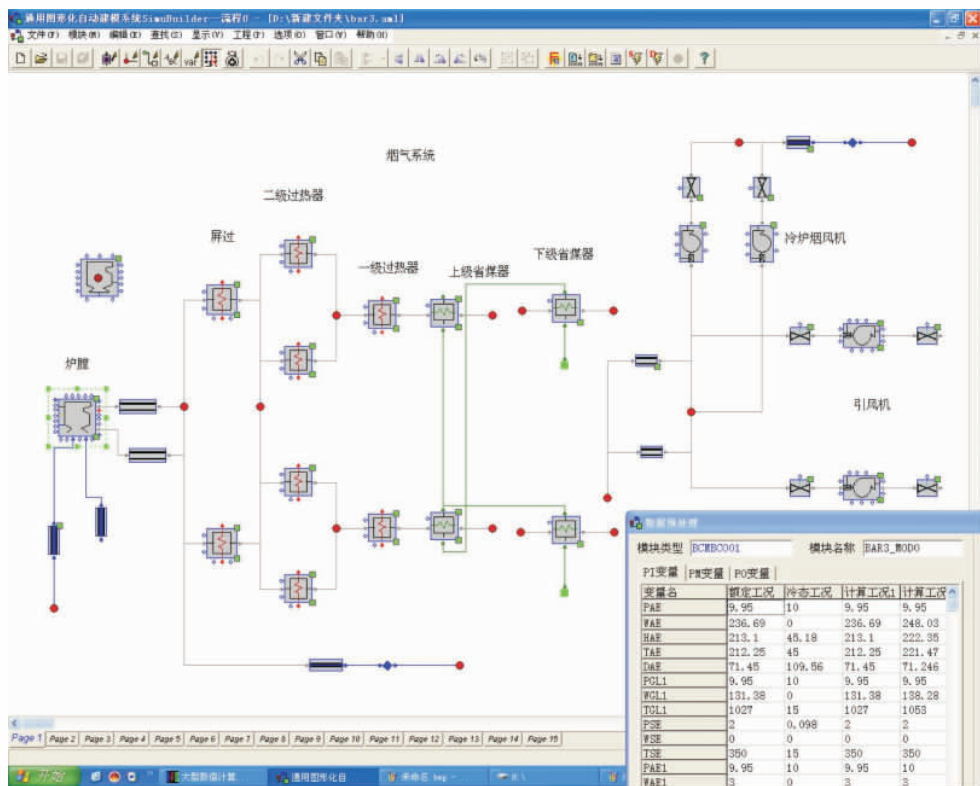


图 5 图形化模块建模示例

Fig. 5 An illustration of graphic modeling

支撑软件是支持仿真系统的模型开发、调试和运行的一体化平台。国内各电力仿真研究单位,都有各自的建模方法和流体网络求解技术^[7],但是来源各异。有些是从外国购买,有些是消化吸收而来,还有极少数是自主研发成功的。例如清华大学开发的面向对象的图形化建模支撑软件平台有两个版本,分别为 ISSE 和 DCOSE,前者用于 UNIX 操作系统,后者用于 Windows XP 操作系统。多年来在这两个平台支持下已为国内外成功开发了约 150 台仿真机。

4 电力工业仿真技术前景

4.1 发电厂是一个信息化集成的自动化工厂

随着计算机技术、网络技术和自动化技术的发展,现代化的发电厂已经逐渐成为一个信息化集成的自动化工厂。除了控制室有 2~3 名操作人员外,生产设备现场基本是无人的,只是定时派出人员巡回。生产过程和全厂管理的全部信息集中在控制室和领导管理部门。因此,仿真技术应用的范围大为扩展,除了仿真培训之外,电厂信息化也成了仿真技术的重要内容。电厂信息化方案总体结构大致由 6 个子系统所组成(见图 6)。

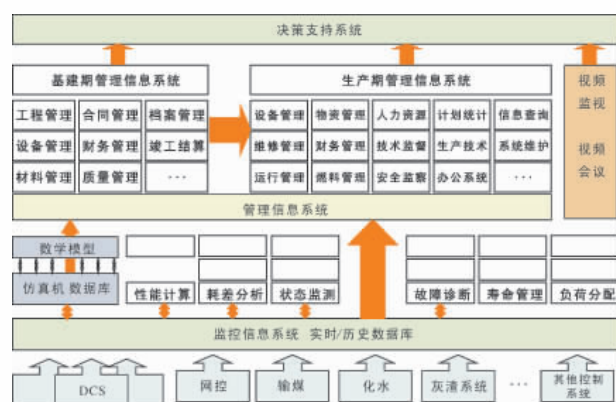


图6 电厂信息化方案的总体结构

Fig. 6 Architecture of information system for power plant

1) 广义 DCS (Distributed Control System): 是生产过程控制层,用于电厂生产过程的控制和调节;它的底层是生产设备,由主设备、辅助设备及监控设备等组成。它是电厂生产流程的基本单元。

2) 厂级监控信息系统 (Super Information System, SIS): 为电厂生产过程如机组负荷分配、机组性能诊断与分析、设备维护等提供决策依据。

3) 仿真研究系统 (Simulator): 为电厂生产运行提供培训、研究平台。

4) 管理信息系统 (Management Information System, MIS): 以安全、经济运行管理为重点,实现电厂生产、经营、管理的全面现代化。

5) 视频监控和会议系统: 提供远程图像监视和远程会议功能。

6) 决策支持系统: 以数据整合 (Data Integration, DI) 为基础,为电厂实现“安全生产,经济运行”提供最终的辅助决策功能,使知识管理 (Knowledge Management, KM)、企业资源计划 (Enterprise Resource Plan, ERP)、客户关系管理 (Customer Relation Management, CRM)、设备资产管理 (Equipment Asset Management, EAM)、企业信息门户 (Enterprise Information Portal) 等先进的网络管理技术可灵活地应用于电厂信息化的完整体系中。

由此可见,仿真培训只是信息化中的一个子系统。

4.2 研究新型发电设备的建模理论和建模技术

随着高效、低污染燃煤发电技术的发展,出现了一批新技术、新设备,特别是锅炉设备更为突出,如循环流化床锅炉、直流锅炉、超超临界锅炉、煤气化发生炉、生物质燃料锅炉等。对这些新型设备仿真的核心难点仍是建模技术,包括对燃烧机理、物理化学过程、设备结构、动力学原理及 SIS 中的性能诊断与分析、设备维护等的深入研究;分别针对它们建立理想和高精度的机理数学模型是仿真科学的基础研究,可以也体现其学术水平。

目前,核电站发电量仅约占我国总发电量的 2%,

但是核电属清洁能源,有很大的发展前景。然而由于高精度反应堆模型计算量巨大,并且该类仿真机的实时性要求很高,都会给仿真建模技术带来困难。

4.3 全国仿真机的联网和网上培训

为使电力部门各单位能够共享仿真机资源,应该首先将发电公司所属各厂仿真机进行联网,使得各厂可以使用本发电公司内部的不同容量或不同设备的仿真机;进一步整个电网系统的仿真机联网,除了系统内部可以共享仿真机资源进行培训外,更可以仿真整个电力系统,以进行电网的调度或各种系统事故的演练或培训,例如模拟某个大型发电厂出现紧急停机事故后电力系统的调度、电网解列和电网震荡,以及自然灾害事故引起大面积停电等重大故障应急处理的训练等。

参考文献 (References)

- [1] 吕崇德, 任挺进, 姜学智, 等. 大型火电机组系统仿真与建模 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
LU Chongde, REN Tingjin, JIANG Xuezhi, et al. Simulation and modeling of fossil power plant [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [2] 吕崇德, 范永胜, 蔡瑞忠. 我国电站仿真技术进展与建模理论研究[J]. 中国工程学报, 1999, 1(1): 99-103.
LU Chongde, FAN Yongsheng, CAI Ruizhong. Development of simulation technologies and researches of modeling theory for power plant in China [J]. Engineering Science, 1999, 1(1): 99-103.
- [3] 范永胜, 眭喆, 姜学智, 等. 一种高精度的锅炉单相区段集总参数动态修正模型[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 50-54.
FAN Yongsheng, SUI Zhe, JIANG Xuezhi, et al. A high precision modified lumped parameter dynamic model applied to uniphase boiler sections[J]. Proceedings of the CCEE, 2000, 20(1): 50-54.
- [4] 刘笑驰, 蔡瑞忠, 吕崇德. 单相受热管的移动参数模型 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2003, 43(6): 772-774, 790.
LIU Xiaochi, CAI Ruizhong, LU Chongde. Moving parameter model for single phase flow in heated pipes[J]. J Tsinghua Univ (Sci Tech ed), 2003, 43(6): 772-774, 790.
- [5] 刘树清, 眭喆, 刘敬伟. 从电厂仿真的需求变化介绍 DCOSE 的仿真环境[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(S2): 1005-1007.
LIU Shuqing, SUI Zhe, LIU Jingwei. Introduction of DCOSE simulation environment from requirement of power plant simulation[J]. Acta Sim Sys Sin, 2006, 18(S2): 1005-1007.
- [6] 蔡瑞忠, 王威, 眭喆, 等. 图形建模中流体网络拓扑结构的定义与识别[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 1999, 39(6): 63-66.
CAI Ruizhong, WANG Wei, SUI Zhe, et al. Flow network topological definition and identification in graphic modeling system[J]. J Tsinghua Univ (Sci Tec ed), 1999, 39(6): 63-66.
- [7] 王超, 吕崇德, 眭喆. 仿真一体化支撑平台技术 [J]. 系统仿真学报, 2003, 15(7): 956-961.
WANG Chao, LU Chongde, SUI Zhe. Research on Simulation Integration Support Platform [J]. Acta Sim Sys Sin, 2003, 15(7): 956-961.

(责任编辑 赵佳)