

● 王扬 光卫 编著

现 代  
火力发电机组  
仿真机技术

MODERN  
POWER PLANT  
SIMULATION

科学出版社

## 序

80年代以来,计算机数字仿真技术已在世界范围内进入普及阶段。促进这种普及过程的动因主要有以下几方面:

(1) 计算机不但应用日益广泛,而且计算环境(人-机界面)和功能(速度、容量、图形图象功能)日新月异。

(2) 仿真软件功能大幅度提高,商品化程度远非70年代可比。

(3) 工农业生产,特别是能源、交通和柔性生产(FMS)部门普遍采用计算机控制和通讯系统,对大规模复杂问题的仿真分析和对复杂生产过程操作人员的仿真培训成为绝对必要。

(4) 随着人类知识的深化,人们意识到通过模型实现仿真分析与培训,对于认识客观事物规律具有无可比拟的优越性。

目前实际运行的种类仿真系统甚多,但从方法论而言不外乎三类:即面向过程的、面向事件的和面向活动的。在仿真领域内把这种方法论归类称为“世界观”(world views)。早期的仿真技术引入了统计学方法和最优化方法,近年把仿真作为一门艺术引入了人工智能(artificial intelligence)、专家系统(expert system)、知识工程(knowledge engineering)一类概念,使仿真实理论与实践都跃上了新高度。许多用于管理的决策支持系统(decision support system)和用于大规模生产系统

控制和操作的实时仿真培训系统也应运而生。80年代后期发达国家普遍推选的即时(just-in-time, JIT)制生产调度系统和近年发展的临境技术,多少也应归功于仿真技术的升华。全世界以仿真命名的学术刊物有数十种之多,每年都召开以仿真为主题的国际学术讨论会。各种通用或专门用途的仿真语言和仿真支撑软件盛极一时。

电力部门的计算机仿真,特别是用于培训的实时仿真,不但在方法论上要兼顾前述三类而权衡取舍,而且在任何意义上说必然是一种结合人工智能的产物,尽管有时并不突出这一点。因此,对于电站(还包括核电站和其他类型发电站)及与之配套的电力系统网络运行状态的计算机实时仿真,质量要求严格而设计难度较大。掌握热能工程技术,而不熟悉仿真技术,充其量只是“跛足巨人”,本书的内容很好地结合了现代仿真技术和先进的热能工程控制技术。

国内专门论述仿真技术的著作为数不多,与美、英、日等国相比,在今天我国经济高速发展的形势下,显得不大相称。本书针对火电机组培训仿真机,全面而深入浅出地详加剖析,不落窠臼地组织好内容,别开生面地把复杂技术与专业知识结合起来,特别是书中专门讨论了并行计算机系统在火电厂仿真机中的应用,这是当代计算机技术发展的主要方向之一,使本书内容更具特色。就我所知,这本书在我国是首创,在国外也将获得很高的评价。

谨向本书读者推荐。我将跟读者一道从学习中获得真知。祝贺作者们的成功。

张启人

1993年7月底

## 前 言

计算机仿真技术原来多应用于军事部门,自从人员培训仿真机用于核电站,很快推广应用于火电厂和电力网调度。仿真技术,特别是火电厂培训仿真系统,近年来在我国发展很快,已经形成一定生产规模,并为电力部门重视。国家原能源部规定,凡配备有4台300MW机组的电厂,都应备有培训仿真机。国内外现代化大型核电站、火电厂已离不开培训仿真机,它成为电厂正常运行的保证,直接或间接产生显著的社会和经济效益。

目前国内各大专院校的热能工程专业都有培训仿真课题,但是尚无这方面的专著,有鉴于此,我们编写了这本书。本书内容全面,深入浅出,论述了现代先进的火电机组培训仿真机技术,可作为有关大专院校或培训中心的参考书,也可作为仿真机用户、开发仿真机的厂家和科研单位的参考用书。相信这本书的出版对火电仿真技术的发展将起推动作用。

书中介绍了仿真机的概念、功能特性,国内外火电机组仿真机的软硬件系统和仿真支撑软件,火电仿真技术的最新进展等。书后附录还包括仿真机合同内容和我国的仿真机标准(征求意见稿)。

曹安云、徐立军参加本书了第5章的编写;张辉屏,林红熈参加了第4章的编写,庄灵珠参加了第6章的编写并负责全书的校对工作。

限于时间和篇幅,有不足之处,欢迎批评指正。

编 者

# 目 录

<b>第1章 概 述</b> .....	1
1.1 电力部门运行操作人员的培训 .....	1
1.2 仿真机的定义和说明 .....	9
1.3 仿真机的分类 .....	11
1.4 仿真精度和逼真度问题 .....	12
1.5 培训仿真机的基本构成 .....	13
<b>第2章 火电机组仿真机的特性与功能</b> .....	18
2.1 仿真培训功能 .....	18
2.2 教员站功能 .....	20
2.3 工程师站功能 .....	26
2.4 就地操作台功能 .....	27
2.5 远方操作功能 .....	28
2.6 分布式控制系统功能仿真 .....	28
2.7 运行人员控制盘台 .....	29
2.8 仿真机的性能规范 .....	31
<b>第3章 火电机组仿真机的计算机系统</b> .....	32
3.1 适用于实时仿真的计算机系统简介 .....	32
3.2 Transputer 并行计算机系统介绍 .....	35
3.3 Transputer 并行计算机的结构特点 .....	38
3.4 Transputer 并行计算机嵌入式产品简介 .....	39
3.5 Transputer 并行计算机软件环境 .....	41

3.6 Transputer 并行计算机通道接口设备 .....	43
3.7 Transputer 并行计算机在火电站培训仿真中的 应用 .....	45
<b>第4章 仿真机中的数学模型 .....</b>	<b>49</b>
4.1 仿真机的数字模型 .....	49
4.2 数学模型的要求及其特点 .....	50
4.3 锅炉模型 .....	53
4.4 汽机模型 .....	66
4.5 电气系统模型 .....	70
4.6 调节与控制逻辑模型 .....	73
<b>第5章 火电机组仿真机支撑软件介绍 .....</b>	<b>79</b>
5.1 火电机组培训仿真机与支撑软件 .....	79
5.2 支撑软件的特点与功能 .....	80
5.3 支撑软件的系统结构 .....	82
5.4 对几种支撑软件的评价 .....	94
5.5 我国第一套面向对象的仿真环境支撑软件系统 PROSIMS .....	96
<b>第6章 Stimulation 仿真方法及系统介绍 .....</b>	<b>108</b>
6.1 德国克努伯公司的 Stimulation 仿真系统 .....	108
6.2 美国西屋公司的 WDPF 仿真机 .....	116
6.3 对 WDPF 仿真机的分析 .....	118
6.4 对 WDPF 仿真机的改造 .....	120
<b>第7章 火电机组仿真机的特殊问题 .....</b>	<b>124</b>
7.1 数学模型中的“病态”问题 .....	124
7.2 大规模 I/O 通道接口的管理问题 .....	125

7.3 盘台显示的特殊问题 .....	125
7.4 仿真机的系统分析功能 .....	126
7.5 仿真盘台的调试 .....	126
7.6 仿真机的置信度问题 .....	127
<b>参考书目</b> .....	<b>130</b>
<b>附录 A 火电机组培训仿真机合同内容</b> .....	<b>131</b>
<b>附录 B 大型火电机组仿真培训装置技术规范</b> .....	<b>137</b>



# 第 1 章 概 述

计算机仿真属高科技重要领域之一,美国政府和中国政府均将计算机仿真列为重点高科技项目。从航空航天、军事作战、大型核电厂、火电厂、大型工业生产过程,到城市、人口、能源、交通发展规划,直至飞机、轮船、火车和汽车驾驶等等,都需要进行工程仿真或培训仿真,当今所有的重大科研课题和工程项目几乎都离不开计算机仿真。

## 1.1 电力部门运行操作人员的培训

本节首先介绍一下美国火电厂培训的发展历史,以便对火电站培训以及仿真机在培训等方面应用的历史与现状有一个全面的了解<sup>[1]</sup>。

二次世界大战前,美国电力部门对运行人员的培训并没有给予重视。当时,火电厂设计简单、操作容易,培训主要是采用在岗培训方式,运行人员直接在工作岗位上学习掌握正确的操作。在以后很长一段时期里,火电厂不断扩大规模,并不断采用新技术,运行人员的数量也不断增加,但是培训方式未变。为了预防锅炉及类似压力容器的爆炸,保护人身安全,曾对锅炉及类似设备的运行人员进行考核;但这些考核往往只注重有关锅炉的基本知识。因此,即使通过考核,仍难保证运

行人员能胜任锅炉系统的安全操作。

二次大战后,火电厂招聘的工作人员基本上能胜任工作,因为他们大多数原来在电厂受过良好的运行培训。同时,火电厂系统仍然相当简单,按今天的标准来看,系统水平是“低技术”的,技术更新也很缓慢,故对加强培训的需求并不强烈,对于培训也没有给予高度重视。这些电厂的工程师和经理凭其所学的专业知识和实际经验已完全能称职,不需要接受培训。

在 50 年代,由于发电容量持续迅速地增长,需要招聘大量新手。一般认为运行人员是最容易培训的,因此很少有人去考虑改进以前那种岗位培训方式。但是,传统的师徒方式已不能适应培养出维护方面的合格技术人员,有些企业开始制订维修人员培训计划。新建电厂的运行人员主要是来自老厂的有经验的人员,这就使得培训工作大为减少。同时锅炉和汽轮机设备的供货厂家也开始针对其制造和安装的系统提供培训服务。

到 60 年代,当先进技术(如超临界参数机组、通用压力锅炉和电动/气动控制技术等)开始应用于火电厂时,对这些系统的维护人员的培训就非常迫切了,这在仪表和控制领域尤显重要。个别电力企业感到急需具备更多知识的操作运行人员,从而开始组织课堂培训,传授理论及有关系统的知识。同时核电厂继续从火电厂抽调大部分富有经验的高素质运行人员,以弥补人员之不足。

进入 70 年代,运行人员“资格”的概念开始在电力部门尤其是核电部门形成,即运行人员须以令人满意的成绩,通过某种知识和技能的测验后,才有资格在电厂承担某项相应的工作。随着核电厂和火电厂的设备及系统日趋复杂,机组的规模

日益扩大,大家都感到需要更多能胜任工作的维修人员,很多企业制订并实施了维修技术培训计划。然而人们尚未充分意识到火电厂同时也需要有受过较好培训的操作运行人员。

由于控制室和所装控制系统以及仪表设备的日趋复杂,并且难以在运行机组上进行人员培训,人们开始提出采用电厂控制室仿真来培训运行人员的想法。在核电领域,一台全范围、高逼真度的数字仿真机,造价通常为500万—1000万美元,与核电厂的造价相比仅是区区小数。而对火电厂来说,购置这样一台仿真机,虽然对培训很有吸引力,但价格太高。有些电力企业从仿真培训中看到了受益前景,促使他们开始购置价格低廉系统简单的模拟式电厂仿真机。通常的做法是把购置仿真机的费用纳入工厂建设投资中,藉以“掩盖”仿真机的费用。然而,即使在这些购置了仿真机的电力企业,也并没有制订或实施正式的运行人员培训法规和上岗资格认定。

火电厂全范围仿真机就是在这—阶段应运而生的。美国电力公司 Amos 3 号仿真机始建于 1973 年。田纳西流域管理局 Cumberland 仿真机购置于 1977 年。它们是与两个核电厂仿真机同时购置的。两台火电厂仿真机都复制了采用新技术的 300MW 通用压力锅炉及汽轮发电机组的控制室功能。与此同时,第一个大型电力培训中心开始建设。此项投资集中在核电厂仿真机和维修培训实验室项目方面,至于火电厂的运行人员仿真培训还很难安排。

70 年代末期,三里岛核电厂的事故从根本上改变了公众和电力部门对核电厂运行人员培训的态度。制造专用仿真机的热潮开始兴起,并持续至今日。

80 年代初期,核电部门采用了严格的运行人员培训标

准,这是三里岛核电厂事故的一个后果。电力部门接受此项标准的事实,本身就表明电力部门已默认正规的、有组织和精心安排的操作运行人员培训,对任何形式发电设备的安全运行都是必不可少的。由于核电工程费用激增,致使许多核电厂项目取消,相应的电厂管理人员和工程技术人员又回到火电厂岗位。大家对运行人员进行严格系统的培训都持肯定的态度。同时,公共电力委员会要求电力部门提高效率,减少由于人员操作失误而造成的损失。这促使许多电力企业对运行人员培训的重要性认识大为提高。各电力企业实施了各种形式的课堂培训计划,以弥补传统的岗位培训的不足,有的则逐步应用仿真机来进行培训。此外,新技术的启用(如分布式数字控制、流化床燃烧等),需要具有高度技能和受过良好培训的运行人员和维修人员。要跟上技术的发展,实施对运行和维修这些新技术设备的人员培训,单靠现有的培训工作人员的方法是难以完成的。事实上,现代科技日新月异,工程师和管理人员在电厂管理和人员培训上已遇到了极大的困难。

任何形式的培训计划的制定和实施费用都是很高昂的。培训主管人员必须作出专门的培训经费预算,而编制此项预算往往会使人们面临这样窘境:若无对良好培训效果的定量说明,就无法确定培训经费,而没有高昂经费的培训计划,又得不到所需的定量的说明。在 80 年代,有几个火电厂进行了统计,力图获得培训对电厂效率和运行水平提高的定量的说明。图 1-1 是某个大型电力企业自 1980 年以来所统计的数据。图 1-1(a)示出每人的年培训小时数和平均事故率所耗时的相互关系。随着每年培训时数的增加,平均耗时代事故率在减少,反之亦有很强的相关性。图 1-1(b)表示培训时间和总事

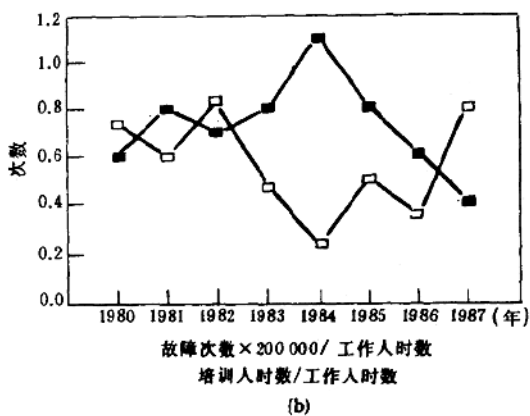
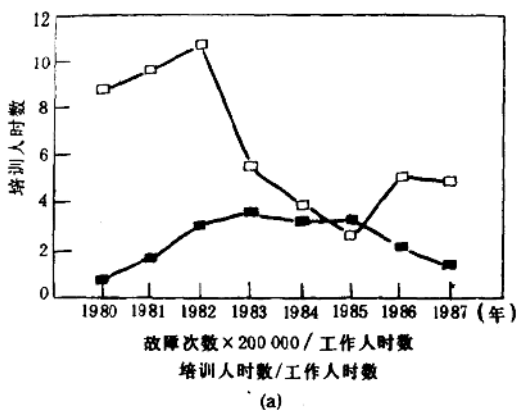


图 I-1

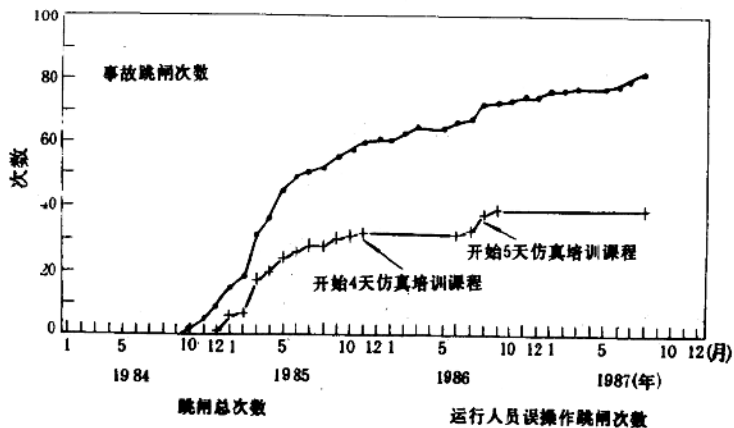


图 1-2

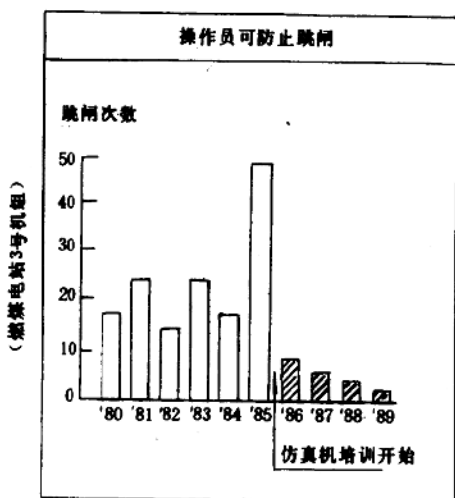


图 1-3

故率之间的类似关系。图 1-2 给出了某电力企业运行人员在一大型燃煤机组仿真机培训机组跳闸故障的效果。在进行仿真机培训前,机组运行跳闸一直很高;在仿真机培训实施后,跳闸故障激剧减少,并保持在零附近。图 1-3 给出了三个燃煤机组使用仿真机培训前后的跳闸故障数统计结果。

虽然这些数据远不能作为各种形式培训合理性的结论性证据,况且尚没有提供培训带来的经济效益的定量数据,但确实说明电力企业这种强化培训的管理方法是正确的。

尽管 80 年代的运行人员培训计划比过去先进了许多,但是在培训方面所遇到的困难还将继续增长。所有这些都表明,在进入 90 年代和 21 世纪后,电力部门更加需要先进的装备和方法用于培训和技术传授。

最早的仿真机是混合型的,即将数字和模拟信号通过几个专用网络组合起来。随着数字计算机技术的发展,第一台全范围数字式仿真机诞生了。最初四台建造于 1960—1973 年间,出于费用和用户等方面的原因,这四台都是由核动力蒸汽发生系统的生产厂家制造的。应用火电厂技术培训的首批仿真机是 1966 年投运的 Ohio 和 Tokyo 电力公司的两个有限范围模拟式仿真机。它们反映了在以后十年中火电厂培训仿真机的技术和培训水平。

仿真机技术开始由核电部门转向火电部门的重要标志,是 1971 年投运的 Tohoku 电力公司 Shisendai 电厂 1 号机组的模拟式仿真机。首台全范围数字式火电厂仿真机也很快于 1973 年制成,Appalachin 电力公司此时也安装了 Amos 电厂 3 号机组仿真机。但至此并非模拟式仿真都由数字式仿真取代,80 年代还陆续有一些火电厂模拟式仿真机问世。

进入70年代,国外火电厂仿真机是作为一个全范围核电厂仿真机的主项工程的外围附加项目来订购的。但在此时,仿真技术却有了巨大发展,功能加强的计算机解决了许多限制仿真效果的运算和时间上的难题。

随着1977年美国核电仿真机标准ANS 3.5的颁布,核电部门开始有组织地进行仿真机培训。但仿真机培训的迅速发展是在1979年的三里岛核电厂事故之后。那时广泛应用于核电部门的仿真机,为后来在核电和火电部门测试仿真机效果提供了更广泛的数据。

尽管对这些数据可用性的解释尚有争议,但它已足以说明火电企业在仿真方面进行投资,在经济效益上是很合算的。在1977—1979年,火电厂的仿真机购买量增加了4倍。到1986年底,全世界至少有200多台火电厂仿真机投入使用,尽管大部分仿真机的仿真范围和程度还很有限。

我国火电仿真机的开发应用始于80年代中期,首先由清华大学开发了200MW火电机组仿真机,进行了超过100次的培训工作。后来,自美国引进了一台300MW火电机组仿真机,安装于北京电力专科学校。

80年代末,国内有关单位又开发了数台200MW和300MW仿真机;有的正式投入使用,有的还处于调试阶段。我国电力部门已充分认识到仿真机技术对我国电力事业发展的重要意义,先后下达了关于仿真机建立和管理的有关文件,原能源部还颁布了大型火电机组全范围培训仿真机技术规范。



## 1.2 仿真机的定义和说明

“核电厂仿真机”这个术语有着准确的含义,即一台核电厂仿真机是对一核电厂全部控制盘台、CRT、仪表和控制室里的其他设备的充分而又完全的复制。

火电厂仿真机却不同,有的人认为它是核电厂仿真机的一个翻版——火电厂控制室的完全复制;而另一些人认为它是若干电厂运行过程的基本原理的计算机仿真,配有简单的火电厂系统图的 CRT 显示和凭籍计算机键盘进行的操作的人机接口;还有人认为是介于上述两者之间的系统。

火电厂仿真有许多术语。例如“部分任务训练器”,是指为提供专项任务培训而设计的小型训练设备或仿真器,其专项任务通常是指需要由人来执行的一项综合任务的一个部分。但也有人将它应用于定义全范围、接近于全复制的可提供 98% 的电厂控制和操作功能的培训任务的仿真机。又如“通用仿真机”,是指一大批各种类型的仿真机。下面将对有关术语作一些定义。

### 1.2.1 部分任务训练器和仿真器

一般认为,部分任务训练器和仿真器是能够对一个具体技能提供培训的设备,这个具体技能只是由人来完成的众多工作的一部分。其典型应用,是对新人员或经验不足人员,提供就设备或过程中某一部分操作的培训,常用于职业学校。另一些部分任务仿真器可能着重于多种较为简单技能的组合性培训。某电厂最近购置了一台简单仿真电站主要系统的部分