

# 秦山 300 MW 核电机组全范围模拟机性能分析

王日清

(秦山核电公司 浙江海盐 314300)

**摘要** 介绍了秦山 300 MW 核电机组全范围模拟机所达到的性能指标. 通过分析该模拟机主要设计特点, 包括核岛应用软件、主计算机和实时模拟支撑软件等, 强调指出, 其性能已超过了培训模拟机的要求, 并对该模拟机的使用范围进行了探讨.

**关键词** 核电机组 全范围模拟机 应用模型软件 实时模拟支撑软件

**分类号** TM623

## 1 作用和性能

秦山 300 MW 核电机组全范围模拟机的主要用途是为该核电机组培训合格的操纵员. 通过在这台模拟机上所进行的操作培训, 操纵员将具有下列方面的能力: (1) 顺利地执行机组启动、停止和负荷变化等操作规程, 使机组稳定地处于所要求的运行状态; (2) 及时地发现机组在运行中出现的异常或故障, 并准确地判断该异常或故障的原因, 并能采取果断的对策, 使异常或故障得以迅速排除; (3) 正确地使用“事故处理规程”, 确保机组在出现诸如主系统管道大破口失水事故工况下的安全.

满足下列要求<sup>[1]</sup>.

1) 模拟机在 25%、50%、75% 和 100% 的额定功率下, 其关键参数, 如核功率、电功率、功率量程核功率指示值、反应堆系统压力、稳压器液位、冷却剂进出口温度和平均温度的值与参考机组的差别小于 1%; 重要参数, 如冷却剂流量、主给水流量、主蒸气流量、上充流量、下泄流量、蒸气发生器液位和汽轮机第一级(冲动级)压力值的差别小于 2%; 其它参数的差别则在 10% 以内. 而且在 2 小时的稳定运行工况下, 上述关键参数和重要参数的漂移分别小于 1% 和 2%.

2) 对至少包括主系统失水事故在内的 25 种异常、故障和事故进行模拟时, 各有关系统的状态、警报装置的响应、控制逻辑程序和自动动作等要完全与参考机组一致, 各有关参数变化趋势应与参考机组相同. 有些故障和事故的严重程度要有一定的可变调节范围.

性能测试结果表明, 秦山 300 MW 核电机组全范围模拟机远远超过了上述规定要求, 即:

1) 不仅限于上述四种额定工况, 也不仅限于关键参数和重要参数, 只要是稳态或准稳态, 各有关参数与其参考机组的对应参数差别均在 1% 之内. 图 1 和图 2 分别给出了模拟机和参考机组上测得的  $T_4$  棒的微分价值和积分价值.

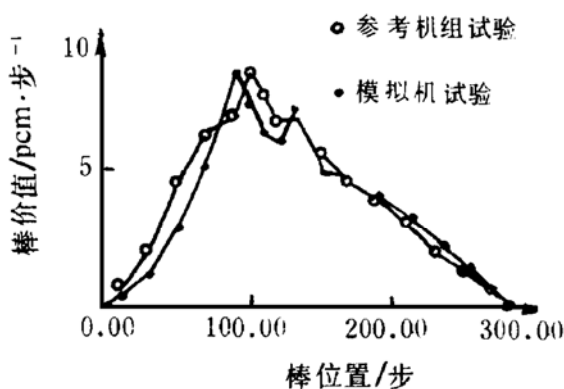


图 1  $T_4$  棒微分价值

由此可见, 为了达到培训操纵员的目的, 模拟机应在性能上对其参考机组实行较高逼真度的模拟. 根据通常采用的标准, 模拟机须

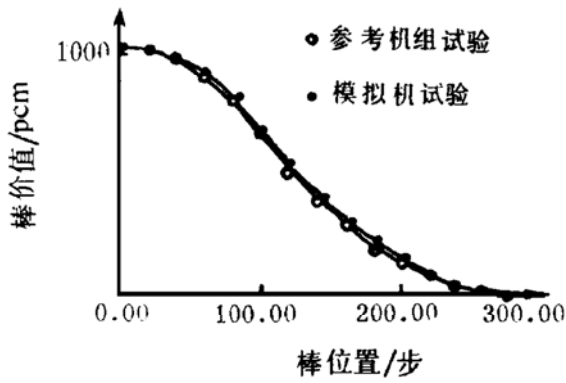


图 2  $T_4$  棒积分价值

$T_4$  棒的微分价值和积分价值测量步骤对模拟机和参考机组而言没有任何差别. 测量时间也都超过 2 小时, 未发现模拟机上指示值有明显的漂移.

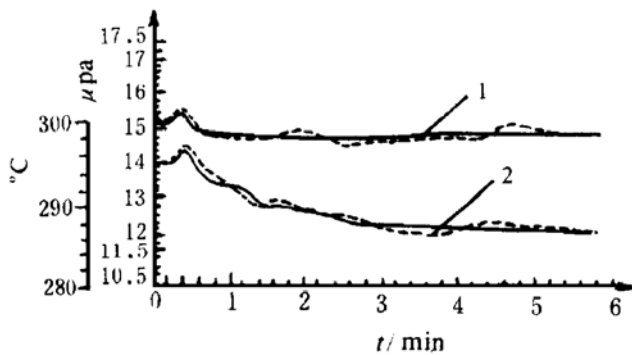


图 3 甩负荷时主参数随时间的变化

1 稳压器压力      2 冷却剂平均温度  
-参考机组试验曲线, ...模拟机试验曲线

2) 共设置了包括失水事故在内的 400 类故障, 1 100 个故障点. 这些故障或事故的模拟是高度逼真的. 许多故障和事故严重程度的调节范围为 0%~100%. 表示和图 3 给出了该模拟机在 75% 额定功率下甩负荷时的各类仪表、设备的控制逻辑响应结果和主要参数的变化曲线, 并注明了与参考机组相符合的情况<sup>[2]</sup>. 此外, 秦山 300 MW 核电机组全范围模拟机还能实现“不停堆的预计瞬态”(the anticipated transient without scram, ATWS)的模拟<sup>[3]</sup>. 这在核电机组全范围模拟上属首次. 这样, 就可以通过在该模拟机的培训, 使操纵员掌握 ATWS 的处理原则, 达到

正确处理的目的.

表 75% 功率时, 气轮机甩负荷的瞬态测试

操作或输入	预期结果	实际结果
瞬态演示		
1 引入初始条件 IC25	电站处于 75% 功率运行	符合
	下列系统处于自动状态	符合
	1 反应堆功率调节系统	
	2 旁排系统	
	3 PRZR 压力控制系统	
	4 PRZR 液位控制系统	
	5 SC 液位控制系统	
2 断 开		
200 IM	1 200 IM 跳开	
	2 气轮机负荷降至 6% 左右	符合
	3 控制棒自动下插	符合
	4 旁路排放阀开启:	符合
	(1)BV-41A 快速全开	符合
	(2)BV-41B 快速全开	符合
	(3)BV-41C 快速全开	符合
	(4)BV-41D 比例开启	符合
	5 主蒸气释放阀不动作	符合
	6 主蒸气安全阀不动作	符合
	7 SG 液位自动调节	符合
	8 主蒸气压力下降后, 释放阀关闭	符合
	9 旁路排放阀依次关闭	符合
	10 主给水流量减小	符合

## 2 机构特点

秦山 300 MW 核电机组全范围模拟机性能指标不仅实现了培训用核电模拟机的要求, 且在许多方面优越于有关标准的规定. 这是因为该模拟机采用了完全符合物理规律的应用模型软件, 配置了图形功能强, 而且最适用于模拟机的主计算机系统, 并辅以精心设计的实时模拟支撑软件系统.

应用模型软件是模拟机的最重要部分. 而反应堆中子动力学模型、反应堆热工、水力

模型和安全壳模型等软件则更是核电机组模拟机的关键部分。

秦山 300 MW 全范围模拟机采用的中子动力学模型为二群、三维带 6 组缓发中子的模型,即

$$\frac{1}{\nu_1} \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} = -D_1 \Delta^2 \Phi_1 + (1 - \beta) \nu \Sigma_f \Phi_2 - \Sigma_{1-2} \Phi_1 - \Sigma_{1a} \Phi_1 + \Sigma \lambda_i C_i \quad (1)$$

$$\frac{1}{\nu_2} \frac{\partial \Phi_2}{\partial t} = -D_2 \Delta^2 \Phi_2 + \Sigma_{1-2} \Phi_1 - \Sigma_{2a} \Phi_2 \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \beta_i \Sigma_f \Phi_2 - \lambda_i C_i \quad (3)$$

式中,  $D_1$ 、 $D_2$  分别为快中子和热中子的扩散系数,  $\Sigma_{1a}$ 、 $\Sigma_{2a}$  分别为快中子和热中子的吸收截面,  $\Sigma_f$  为热中子裂变截面,  $\Sigma_{1-2}$  为快中子减速至热中子的截面;  $\nu_1$ 、 $\nu_2$  分别为快中子与热

中子的速度,  $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$  分别为快中子与热中子的通量;  $\nu$  为每次热裂变时所放出的快中子数目,  $C_i$  为第  $i$  组缓发中子先驱核的浓度,  $\lambda_i$  则为第  $i$  组缓发中子先驱核的衰变常数,  $\beta$  ( $\beta_i$ ) 为缓发中子 ( $i$  组) 份额。

方程(1)、(2)和(3)即为不久前反应堆堆芯设计所采用的计算模型,现仍用于反应堆换料的燃料管理计算。

采用的反应堆冷却剂系统的热工、水力计算模型由多节点、描述二相流和双组分五个基本守恒方程组成:1 不可凝结气体质量守恒方程;2 蒸气质量守恒方程;3 汽(气)-液混合物动量守恒方程;4 汽(气)-液混合物能量守恒方程;5 汽(气)能量守恒方程。

系统被分为 58 个节区,在每个节区内求解上述五方程组,见图 4。

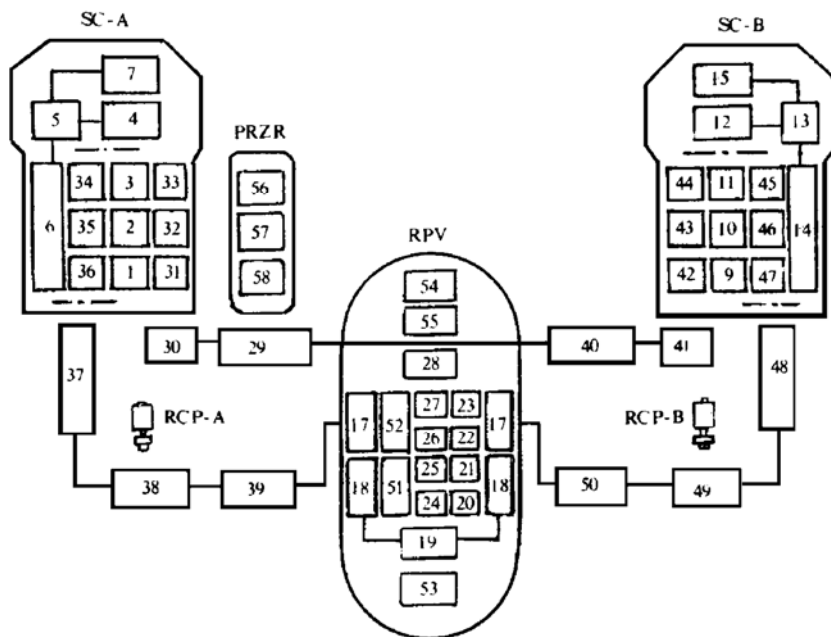


图 4 反应堆系统节点划分

该模型还采用漂移流理论计算分式和破口临界流量计算公式,因而能较真实地反映二相间不均匀流动和二相不平衡状态存在的影响.这个模型也很接近核电站设计中所采用的计算模型。

安全壳行为的正确模拟对培训操纵员了解诸如大破口失水事故的现象和掌握其处理

对策十分重要.该模拟机所采用的安全壳模型为多层次(3层)-多节点(3×5节点)模型.在考虑到壳内各种热量交换和质量迁移过程存在的前提下,对每个节点进行能量、质量平衡计算.大破口失水事故时安全壳行为测试结果表明,如果除去最终安全分析报告中所采用的一系列的保守假设外,该模型所得到

的壳内压力变化曲线与该报告符合得相当好,见图 5。

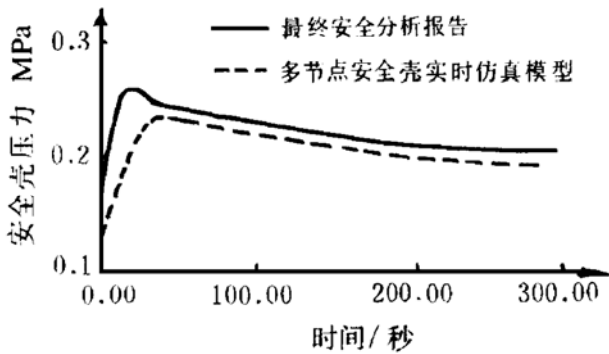


图 5 大破口失水事故安全壳内压力变化

该模拟机采用的主计算机为 CHALLENGE-L. 这是以 MIPS R4400 MC 64 位处理器芯片为核心的多处理器计算机系统, 字长 64 位, 主频 150 MHz, 双 CPU, 运行速度大于 200 MIPS, 120 MFLOPS, 系统总线速度为 1 200 兆字节/秒。

CHALLENGE 系列的计算机是美国 SGI 公司新近推出的, 图形功能极强. 它最适合用于模拟机系统. 所以, 拟在 1996 年后投入运行的核电机组的模拟机, 如瑞典 900 MW 核电机组全范围模拟机, 武汉核动力运行研究所研制的核电机组分析用模拟机等, 其主计算机均选用这个系列。

上述应用模型软件和计算机硬件系统还须在一个与之相适应的实时模拟支撑软件系统的协助下, 方能完成对参考机组进行高逼真度的实时模拟的任务. 这个支撑软件就是 ASCA. 它具有以下主要特点: (1) 能提供界面友好的大型数据库; (2) 各种的进程空间通讯均共享内存; (3) 支持多个并行的模拟环境, 并能使这多个模拟环境进行有序合成; (4) 能自动生成源程序系统; (5) 具有支撑图形编辑功能; (6) 能提供有关的错误诊断的信息。

### 3 其它作用

综上所述, 秦山 300 MW 核电机组全范围模拟机的核岛模型十分接近实际反应堆设

计所采用的模型, 其主计算机系统很先进, 精心设计的实时模拟支撑软件系统又广泛地吸收了国际上众多的同类产品的长处. 所以, 在许多性能方面, 该模拟机具备了复制其参考机组的能力, 也即实现了对参考机组的高逼真度的实时模拟。

该模拟机自 1995 年 11 月投入运行以来, 已有近 80 名核电厂反应堆操纵员在其上进行了操练, 他们完成了所设的培训课程, 效果十分显著。

鉴于其性能远远超出了培训用模拟机标准的要求, 所以该模拟机还可承担以下科研任务。

1) 验证运行规程 对新制定的运行规程, 可以确定其正确性以及适用范围和程度. 验证新制定的秦山 300 MW 核电机组的“应急运行规程”的准备工作, 包括正在制定的验证方案, 计划 1997 年 1 月将在该模拟机上实施. 对已使用的运行规程进行修改时, 该模拟机可以帮助确定其修改的必要性, 进而确定最佳修改方案。

2) 验证设计修改 任何 300 MW 机组主控制室仪表系统的修改, 特别是涉及到设备控制逻辑等方面的修改, 也可先在该模拟机上进行验证, 以确保机组运行的安全、可靠。

3) 分析运行事件 在模拟机上复原参考机组上发生的运行事件, 对运行安全分析是十分重要的. 这台模拟机已经进行这方面的工作, 并且颇有成效。

4) 预演 300 MW 核电机组的试验 秦山 300 MW 核电机组的试验, 特别是涉及安全的试验, 一定要先在这台模拟机上实施. 从中可以了解试验的后果并掌握试验的关键, 确保该机组试验成功。

自 1996 年起, 国家核安全局要求的秦山核电厂每年一次的事故应急演练将通过该模拟机进行. 这样, 对参与人员来说颇具真实感。

## 参 考 文 献

- 1 ANSI and ANS. American National Standard for Nuclear Power Plant Simulators for Use in Operator Training ANSI/ANS 3.5-1993
- 2 Wang Riqing. Development of the Full-scope Simulator for Qinshan 300 MW Nuclear Power Unit. Proceedings of IAEA Expert Meeting on Design of Training Centre for Nuclear Power Plant. New London, U S A, June 1996,32
- 3 朱晓斌. 秦山 300 MW 核电机组全范围模拟机故障和瞬态测试. 核动力工程, 1996,17(3):108

## On Full-scope Simulator for Qinshan 300 MW Nuclear Power Unit

WANG Riqing

(Qinshan Nuclear Power Company, Haiyan, Zhejiang 314300)

**Abstract** The performance indicatrix of the full-scope simulator for Qinshan 300 MW nuclear power unit is described. Main design characteristics of the simulator, including calculation models for its nuclear island, its computer and real-time simulation support software, are introduced. Its performance is proved better than the requirement for use only in training operators and therefore, the fullscope simulator could be used for other studying.

**Key Words** nuclear power unit full-scope simulator model real-time simulation support software

(上接第 58 页)

## Diagnosis of Fat Malabsorption with $^{13}\text{C}$ -breath Test

CHEN Wanmu

(Chemistry Division, Lanzhou Medical College, Lanzhou 730000)

CHEN Daan

(Section of Nuclear Medicine, the first Hospital Affiliated  
with Lanzhou Medical College, Lanzhou 730000)

**Abstract** The experiment in which  $^{13}\text{C}$ -trioctanoin was used as a labeled substrate to diagnose the disease about fat malabsorption was explained and followed by a research on the diagnosis of the same disease with  $^{13}\text{C}$ - substrate. Both of the experiments proved effective, moreover the latter would be better since the stable isotope is harmless.

**Key Words** fat malabsorption  $^{13}\text{C}$ -trioctanoin breath test