

ICS 27.120.20

F 83

备案号: 29113-2010

**NB**

# 中华人民共和国能源行业标准

NB/T 20015—2010

代替 EJ/T 442—1998

---

## 核电厂操纵人员培训及考试用模拟机

Nuclear power plant simulators for use in operator training and examination

2010-05-01 发布

2010-10-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言 ..... II

1 范围 ..... 1

2 术语和定义 ..... 1

3 总则 ..... 3

4 测试要求 ..... 8

5 模拟机的配置管理 ..... 13

附录 A（资料性附录） 模拟机设计和测试文件编制导则 ..... 16

附录 B（资料性附录） 模拟机可运行性测试实施导则 ..... 19

附录 C（资料性附录） 模拟机稳态允许误差应用范例 ..... 22

附录 D（资料性附录） 本标准与 ANSI/ANS-3.5—2009 的主要技术差异及其原因 ..... 23

参考文献 ..... 24

## 前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准代替EJ/T 442—1998《核电厂操纵员培训及考试用模拟机》。

本标准与EJ/T 442—1998相比主要有以下变化：

——3.2中增加了新的能力要求和故障；

——修改了3.3、3.4、3.5；

——4.5中增加了4.5.2“模拟机验证测试”、4.5.4.3“模拟机基于场景的测试”、4.5.4.4“模拟机反应堆堆芯性能测试”和4.5.4.5“事件后模拟机测试”等内容；

——增加了附录D。

本标准参考了ANSI/ANS-3.5—2009《核电厂操纵人员培训及考试用模拟机》。本标准与ANSI/ANS-3.5—2009的主要技术性差异参见附录D。

本标准由核工业标准化研究所归口。

本标准起草单位：核动力运行研究所。

本标准主要起草人：齐克林、王剑平、朱玉龙、李青、单福昌、李姝、刘伟。

本标准于1989年12月首次发布，1998年3月第一次修订。

# 核电厂操纵人员培训及考试用模拟机

## 1 范围

本标准规定了用于操纵人员培训及考试的压水堆核电厂控制室全范围模拟机的功能要求,以及模拟机的模拟范围、性能和功能准则。

本标准适用于压水堆核电厂控制室全范围模拟机(以下简称模拟机)的验证确认、使用和软硬件维护管理。

非压水堆型的核电厂控制室全范围模拟机也可参照使用。

## 2 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 2.1

**参考机组** reference unit

确定模拟机控制室配置、系统控制设置和设计数据库所依据的特定的核电厂机组。

### 2.2

**模拟** simulation

使用模拟机开发环境下的建模技术来复现参考机组的系统或子系统。被模拟的系统的性能和逼真度满足基于参考机组设计和运行数据而规定的功能和运行限定。

### 2.3

**实物模拟** stimulation

在模拟机中使用参考机组的系统或子系统的真实硬件和软件来复现参考机组的相应系统或子系统。

### 2.4

**虚拟实物模拟** emulation

特指通过将参考机组的系统或子系统的软件移植到模拟机运行环境下工作(其硬件平台可以是模拟主机,也可以是独立的计算机),来复现参考机组的系统或子系统。虚拟实物模拟的系统或子系统的性能和物理逼真度与参考机组的系统或子系统是完全相同的。

### 2.5

**外观模拟硬件** visually simulated hardware

仅在模拟机控制台盘上提供真实外貌和视觉导向,而与动态模拟模型无接口的硬件。

### 2.6

**初始条件** initial condition

一套代表参考机组状态而实时模拟又可从这一状态开始的数据。

### 2.7

**快照** snapshot

在模拟机运行的任意时刻保存模拟参考机组的当时状态,此状态可以作为以后调用的初始条件。

### 2.8

**回溯** backtrack

重新设置模拟机到其运行过程中某前一时刻所处状态。

2.9

**实时模式 real time**

按照与参考机组动态性能相同的时基关系、顺序、持续时间、速率和加速度所进行的动态模拟。

2.10

**快速模式 fast time**

相对于实时模式，提高部分或全部计算值模拟速度。

2.11

**慢速模式 slow time**

相对于实时模式，降低部分或全部计算值模拟速度。

2.12

**冻结 freeze**

暂停模拟进程。

2.13

**运行 run**

继续模拟进程。

2.14

**重演 replay**

对模拟机培训过程进行记录，并重新演示所记录的全部或部分模拟机培训过程。

2.15

**超控 override**

中断或修改模拟机数学模型与盘台仪表之间的输入/输出数据传递。

2.16

**故障 malfunction**

由教练员控制的被模拟电厂部件、设备或系统性能下降的模拟机特性或能力。超控能力不看作为故障。

2.17

**被动故障 passive failure**

只有在设备或系统投入运行时其故障现象才显现的设备或系统故障。

2.18

**专家 subject matter expert**

具有适当学历、执照、经验或专门资格，因而能够在某个特殊主题领域进行评审和提出建议的人员。

2.19

**最佳估算 best estimate**

根据专家对特定工况的工程评价或运行评估而产生的关于参考机组性能的预计数据。

2.20

**计算值 computed values**

根据模拟机数学模型计算得出的表征参考机组系统或设备状态的参数值。

2.21

**设计数据库 design data base**

作为模拟机硬件或软件设计依据的设计文件、性能数据、记录、假设、简化、推导以及其他确定的数据。

2.22

**运行规程 operating procedures**

参考机组规程的受控拷贝，包括正常、异常、事故、应急、监督及报警响应的规程。

## 2.23

**性能测试 performance testing**

为了将模拟机的性能与实际的或预计的参考机组性能进行对比验证而实施的测试。

## 2.24

**重现性 repeatability**

在以相同的时基关系、顺序、持续时间、速率以及加速度，对模拟机的动态性能进行反复测试的情形下，模拟机依次对这些测试产生相同的结果（在本标准要求的限度内）的能力。

## 2.25

**实体逼真度 physical fidelity**

模拟机与参考机组在盘台、设备、仪表、控制器、标牌的实体布置及其形状和功能等方面相似的程度。

## 2.26

**明显差异 noticeable difference**

能够由观察者辨别、并经专家证实的模拟机与参考机组之间的物理属性或动态响应的差异。

## 2.27

**操纵人员 operator**

已取得从业执照的电厂操纵员、高级操纵员，或为取得操纵员或高级操纵员从业执照而参加培训的人员。

## 2.28

**场景 scenario**

任意一组根据以操纵人员熟悉、培训或考试为目的的课程计划或指南而实现的模拟机运行过程。

## 2.29

**负面培训 negative training**

在其配置或性能会导致操纵人员对参考机组产生不正确的响应或理解的模拟机上进行的培训。

## 2.30

**系统化培训方法 systematic approach to training**

一个普遍采用的流程，用于建立和保持基于绩效的、质量合格的培训大纲，以满足参考机组上所规定的岗位工作要求。其内容包括分析、设计、开发、实施、评价和结果反馈。

## 2.31

**培训需求评估 training needs assessment**

由专家对模拟机的偏差、缺陷或变更及其对操纵人员执行规定任务的相对影响程度所作出的评价。

## 3 总则

## 3.1 概述

用于操纵人员初始培训、再培训以及考试的核电厂模拟机应以某一特定机组为参考机组。模拟范围应使操纵人员在模拟机上使用参考机组的运行规程处理某一变化过程所采取的操作行动与在参考机组上采取的操作行动相同。模拟范围应允许处理本章所规定的全部变化过程，直到获得一个稳定的工况。

应建立一个结构化软件设计和测试的流程来控制模拟机的修改。模拟机的整体设计宜考虑考试保密性的措施。此外，应提供模拟机验证和确认测试、性能测试以及配置管理的能力。

## 3.2 模拟机的能力

### 3.2.1 一般要求

由操纵人员的操作、无操纵人员操作、操纵人员不适当的操作和参考机组自动控制和固有特性而导致的模拟机响应应是逼真的，不应违背质量、动量和能量守恒等自然物理定律，并且符合第4章验证、确认和性能测试准则的规定。

### 3.2.2 实时和重现性

在处理本章规定的变化过程时，模拟机应能够实时运行，并具有重现性。

### 3.2.3 模拟极限

为了满足实时模拟的要求，有时需将物理过程的数学模型进行简化。这种简化可能会限制模拟机处理某些动态过程的能力。另外，也可能在模拟机上出现超出参考机组设计限值的模拟过程，此时模拟可能不正确，这种模拟过程事例包括：安全壳失效和堆芯熔化。为避免可能造成的负面培训，当模型参数达到或超越某个数值，而这个数值预示事件超过可执行的模拟范围或参考机组的预期状态时，应有自动的或行政的控制措施提醒教练员。

### 3.2.4 正常运行

#### 3.2.4.1 概述

模拟机应能够在不改变数学模型或初始条件的情况下，连续地模拟3.2.4.2和3.2.4.3所列的参考机组的变化过程。

模拟机应能够计算出不同工况的系统参数，并在相应的仪表上显示这些参数，同时给出正确的报警及保护系统的动作。

#### 3.2.4.2 稳态运行

模拟机应准确地模拟在可获得参考机组数据的运行范围内的参考机组的稳态响应。

#### 3.2.4.3 变工况运行

在操纵人员进行类似参考机组正常操作的情况下，模拟机至少应正确地模拟下列变化过程：

- a) 机组从冷停堆至额定功率工况；
- b) 机组从额定功率至冷停堆工况；
- c) 负荷变化；
- d) 操纵人员进行安全级设备或系统的监督试验。

对于以上未列出的其他变化过程，例如反应堆寿期末降功率运行、半管运行、换料操作或将反应堆容器开盖后的变化过程等，允许通过改变数学模型或初始条件，用不连续的方法来实现。

### 3.2.5 故障

作为系统化培训方法过程的一个部分，设计以绩效为基础的操纵人员培训大纲时应确定模拟的故障的类型和数量。故障选择过程中宜使用下列参考资料：

- a) 运行事件报告、重要事件报告和重要运行经验报告；
- b) 概率安全评价研究结果；

- c) 核蒸汽供应系统和核电厂配套设施制造厂提供的设备可用率和可靠性数据,以及有关的技术手册;
- d) 厂址的设计考虑和参考机组特有的运行经验;
- e) 国家核安全局和核行业的规定和通报;
- f) 参考机组的安全分析报告。

模拟机上所要求的特定故障能力应满足参考机组持照操纵人员培训大纲的有关要求。模拟机应包括下列故障:

- a) 丧失反应堆冷却剂(蒸汽发生器传热管较大的泄漏;安全壳内、外的泄漏;显示出多相流现象的大、小破口事故;稳压器安全阀和卸压阀故障);
- b) 仪表压缩空气系统全部失压或可隔离部分失压,影响机组的静态或动态性能;
- c) 电厂输配电系统故障,包括丧失厂外电源、丧失应急电源、应急发电机故障、机组配电母线失电、单条交流或直流仪表电源母线失电、单个电源柜和单个用电负荷失电,以及全厂断电;
- d) 单台或多台反应堆冷却剂泵故障,导致堆芯丧失强迫的冷却剂流动;
- e) 丧失冷凝器真空,包括冷凝器水位控制故障和冷凝器破管;
- f) 丧失厂用水或单个设备的厂用冷却水;
- g) 丧失停堆冷却能力;
- h) 丧失全部或单个设备的冷却水;
- i) 丧失正常给水,或正常给水故障;
- j) 丧失全部给水(包括正常及应急给水);
- k) 丧失一个保护系统通道;
- l) 控制棒故障,包括卡棒、未耦合、滑棒、落棒、棒失步和失控提棒等;
- m) 控制棒拒动;
- n) 燃料包壳破损,导致反应堆冷却剂和废气比放高,并产生相应的高放射性报警;
- o) 汽轮机紧急停机;
- p) 发电机紧急停机;
- q) 影响反应性控制和堆芯热量排出的自动控制系统的故障;
- r) 反应堆冷却剂压力和容积控制系统故障;
- s) 反应堆紧急停堆;
- t) 主蒸汽和主给水管安全壳内外破裂;
- u) 核测仪表故障;
- v) 过程仪表、报警和控制系统故障;
- w) 设备被动故障,如专设安全设施或应急给水系统内的设备故障;
- x) 紧急停堆系统故障;
- y) 主蒸汽旁路排放系统故障。

模拟机应支持包括同时发生或顺序发生的多个故障在内的异常和应急事件的实施,以再现参考机组的固有响应和自动控制功能。在操纵人员的操作随事件的严重程度而变化的情形下,相应故障的严重程度应是可调的,且可调范围的大小足以体现参考机组的可能工况。当培训需求评估认为需要时,模拟机应支持由于操纵人员操作或支持系统故障引起的系统和设备的后续故障。

应按第4章的要求,将模拟机的响应与参考机组的实际响应或参考机组的最佳估算相比较。模拟机应支持操纵人员进行恢复或缓解故障后果的操作。模拟范围应使模拟机能够获得稳定、可控和安全的工况,并能够运行到冷停堆工况或直到模拟极限(见3.2.3)。

### 3.3 模拟范围



### 3.3.1 实体逼真度和人因

#### 3.3.1.1 台盘

模拟机应包括主控室和辅助控制室的各种台盘、控制台和操作站，以便提供进行3.2.4.3规定的正常运行操作和3.2.5规定的故障处理所必需的控制、仪表、报警和其他人机界面。

#### 3.3.1.2 仪表、控制、标识和操纵人员辅助工具

模拟机台盘、控制台和操作站应包括在正常、异常和应急运行中需要使用的仪表、控制器件、标识、操纵人员辅助工具和其他部件或显示器件。

应考虑以下各项：

- a) 开关；
- b) 控制器；
- c) 指示仪表；
- d) 记录仪；
- e) 系统模拟图；
- f) 分隔线；
- g) 文字和图形的刻印；
- h) 颜色；
- i) 台盘布置；
- j) 电厂计算机；
- k) 灯光；
- l) 报警装置；
- m) 标牌；
- n) 触觉暗示；
- o) 显示系统。



#### 3.3.1.3 控制室环境

应模拟参考机组控制室在正常、异常和应急运行时的环境特性。应模拟操纵人员指挥就地操作时所使用的通讯系统，至少可通过适当的通讯系统与教练员进行联络。

应考虑以下各项：

- a) 平面布置；
- b) 照明特性；
- c) 通讯；
- d) 装潢(包括家具)；
- e) 总体外观；
- f) 音源及效果；
- g) 障碍物。

#### 3.3.1.4 控制室差异

在模拟机与参考机组之间存在实体逼真度和人因差异的情况下，那些经过培训需求评估并且符合4.3.1.4要求的差异可以保留。

### 3.3.2 模拟的系统及其完整性

### 3.3.2.1 控制室监控的系统

模拟范围应包含操纵人员进行3.2.4.3规定的正常变工况运行操作和3.2.5规定的故障处理操作所需的参考机组系统。这些系统应有足够完整性，以致于操纵人员能够如同在参考机组上一样进行有关的操作和观察模拟机组的响应。模拟范围应包含所模拟的系统之间的相互作用，以提供综合的机组响应。

### 3.3.2.2 控制室外监控的系统

模拟范围应包括在进行3.2.4.3规定的正常变工况运行和3.2.5规定的故障处理时需要的控制室外操作或监视的系统。应使操纵人员能够以参考机组上类似的方式处理就地操作。

## 3.4 模拟机教练员站功能

### 3.4.1 初始条件

模拟机应能够储存支持3.2.4列出的正常变工况运行的足够数量的初始条件。应确定一组用于操纵人员的培训和考试的初始条件，并对其采取行政手段进行管理控制。这组初始条件应包括参考机组的各种运行工况，包括各种功率运行工况、启动至停机中的主要变化过程、不同堆芯寿期以及裂变产物毒素浓度的效应。

### 3.4.2 故障

模拟机应具有引入3.2.5规定的和持照操纵人员培训大纲规定的故障的能力。

模拟机应具有随时引入故障的能力，能够同时或按顺序引入多个故障，并能够恰当地终止这些故障。也宜具有事件触发及时间触发的故障引入方式。故障的引入不应以任何有别于参考机组出现故障的方式提醒操纵人员将要发生的事件。

### 3.4.3 其他功能

模拟机应具有冻结、运行、快照、回溯、控制室台盘硬件超控和重新设置初始条件的功能。

模拟机还宜具有重演、慢速模式、快速模式、部件故障、操纵人员操作监控、参数监视和绘制图表等功能。

对于实物模拟的系统以及在独立于模拟主机的计算机上运行的虚拟实物模拟的系统来说，应具备对冻结、运行、重新设置初始条件、快照及回溯功能的支持能力。

### 3.4.4 就地操作功能

模拟机应使教练员能够进行3.2.4和3.2.5规定的在控制室以外的就地操作，例如：改变阀门、断路器及其他就地操作的设备的状态。也可以实施以增强教练员对参考机组外部环境（如大气温度和循环水温度等）模拟的控制能力为目的的功能特征。当参考电厂有多台机组时，如果没有其他措施控制对参考机组操纵人员响应有影响的公用资源，诸如来自其他机组的汽源、压缩空气、供电等，则教练员应有能力对其进行控制。

### 3.4.5 数据采集

模拟机应具有电子方式记录选定的模拟参数，和以绘图或打印输出方式提供这些参数的硬拷贝数据的能力。

测试数据采集功能应提供足够的参数精度和时间分辨率，以鉴定其符合第4章中规定的测试准则。

## 3.5 模拟机测试

### 3.5.1 概述

应进行验证、确认和性能测试，以保证模拟机控制室和模拟的系统与参考机组控制室和系统之间不存在明显的差异。

### 3.5.2 模拟机验证测试

模拟机验证测试是软件开发测试的一种形式。模拟机验证测试应如此进行：将被模拟的部件或系统的软件设计与原先的需求相比较，以保证软件开发过程中的每一步完全涵盖了前面步骤的所有要求。

### 3.5.3 模拟机确认测试

模拟机确认测试是软件开发测试的一种形式，应通过将分调或联调的方式下模拟部件或系统的结果与实际或预计的参考机组性能数据比较来进行模拟机确认测试。

### 3.5.4 模拟机性能测试

#### 3.5.4.1 概述

模拟机性能测试包括可运行性测试、基于场景的测试、反应堆堆芯性能测试和事件后模拟机测试。模拟机性能测试应在完全集成情况下进行。

#### 3.5.4.2 模拟机可运行性测试

为了确认全部模拟机的模型的完整性和一体性，模拟机可运行性测试应通过测试下列内容来进行：

- a) 模拟机稳态性能；
- b) 对应于一组基准瞬态的模拟机瞬态性能。

#### 3.5.4.3 模拟机基于场景的测试

为了保证模拟机有能力产生预期的参考机组响应来满足预定的学习和考试目标，应通过利用现有的培训和考试场景确认过程来进行模拟机基于场景的测试。

至少，下列类型的模拟机场景应该经过基于场景的测试：

- a) 首次取照考试场景；
- b) 持照操纵员年度复训考试场景；
- c) 用于反应性控制操作体验的场景。

对于操纵人员培训的其他场景，宜考虑进行补充的基于场景的测试。

#### 3.5.4.4 模拟机反应堆堆芯性能测试

应进行模拟机反应堆堆芯性能测试，以确认模拟机的中子动力学和热工水力学模型复制了模拟范围内的参考机组的堆芯响应。

#### 3.5.4.5 事件后模拟机测试

某些参考机组事件提供了获得相关参考机组性能数据的机会。宜针对这些数据进行事件后模拟机测试，以确认模拟机有能力重现模拟范围内相关参考机组参数的响应。

## 4 测试要求

### 4.1 概述

制定下列验证、确认和性能测试准则是为了保证模拟机控制室和模拟的系统与参考机组控制室和系统之间不存在明显的差异。4.2~4.5规定了模拟机各主要性能的评价要求。

## 4.2 模拟机能力准则

### 4.2.1 实时和重现性

应证实用以满足3.2要求的模拟机软件能在设计的时间间隔内完成执行并具有重现性。同时，应证实连续反复进行的模拟机测试在时基关系、顺序、持续时间、速率和加速度等方面不存在明显的差异。

### 4.2.2 模拟极限

应证实模拟极限是模拟机设计数据库的一部分，在达到或超出模拟极限时有自动的或行政的控制措施提示教练员。

### 4.2.3 正常运行

#### 4.2.3.1 概述

应证实在不改变数学模型的情况下能连续地模拟3.2.4所列参考机组的变化过程。

#### 4.2.3.2 稳态运行

4.2.3.2.1 应证实模拟机能够在有完整的参考机组数据的三个功率水平上准确地模拟参考机组的稳态响应，该三个功率水平应至少跨越50%额定运行功率范围。所选取的功率水平状态应以模拟机连续运行的方式获得。

应将各参数的计算值与参考机组的数据进行比较，确认其误差在下列允许的范围。以下各条未列出的参数计算值的误差应在参考机组相应参数仪表量程的10%以内。将模拟机计算值与参考机组数据进行比较时，允许存在额外的误差，但不应超过参考机组相应仪表的标定误差。附录C提供了稳态误差计算的范例。模拟机仪表误差应不大于参考机组相应的指示仪、记录仪及其相关仪表系统的误差。

4.2.3.2.2 应证实下列各参数的计算值与参考机组数据之间的误差小于参考机组相应仪表量程的1%：

- a) 反应堆冷却剂平均温度；
- b) 反应堆冷却剂环路热段温度；
- c) 反应堆冷却剂环路冷段温度；
- d) 反应堆热功率；
- e) 核测系统功率量程指示；
- f) 反应堆冷却剂系统压力；
- g) 蒸汽发生器压力；
- h) 稳压器液位。

4.2.3.2.3 应证实下列各参数的计算值与参考机组数据之间的误差小于参考机组相应仪表量程的2%：

- a) 蒸汽发生器给水流量；
- b) 反应堆冷却剂系统流量；
- c) 蒸汽发生器水位；
- d) 上充流量；
- e) 下泄流量；
- f) 主蒸汽流量；
- g) 汽轮机冲动级压力；
- h) 发电机功率。

#### 4.2.3.3 变工况运行

应通过比较来证实模拟机上规程的执行结果正确地模拟了参考机组在相同功率水平下响应,与参考机组规程和数据可用性相符合。

应证实模拟机在根据3.2.4.3的要求进行变工况运行时,能满足以下验收准则:

- a) 与参考机组启动试验规程的验收准则相同;
- b) 与参考机组监督试验规程的验收准则相同;
- c) 与参考机组正常运行规程的验收准则相同;
- d) 模拟参数的任何可见变化趋势与参考机组相应参数的实际的或最佳估算的变化趋势相一致;
- e) 若参考机组出现报警或自动动作,则在完全相同的状态下,模拟机上也应出现;
- f) 若参考机组不出现报警或自动动作,则在完全相同的状态下,模拟机上也应不出现。

#### 4.2.4 故障

应证实模拟3.2.5规定的故障的过程中,模拟机满足下列验收准则:

- a) 能够在模拟机上使用参考机组的运行规程;
- b) 模拟参数的任何可见变化趋势与参考机组处于相同故障状态下的实际的或最佳估算的变化趋势一致;
- c) 若参考机组出现报警或自动动作,则在完全相同的状态下,模拟机上也应出现;
- d) 若参考机组不出现报警或自动动作,则在完全相同的状态下,模拟机上也应不出现。

#### 4.3 模拟范围

##### 4.3.1 实体逼真度和人因

###### 4.3.1.1 台盘

应证实按3.3.1.1要求所模拟的控制盘、控制台和操作站的尺寸、外形、颜色及布置是按照参考机组进行复制的。应证实明显差异已消除,或依照4.3.1.4提供的准则实施了培训需求评估。

###### 4.3.1.2 仪表、控制、标识和操纵人员辅助工具

应证实根据3.3.1.2要求所模拟的控制盘、控制台和操作站上的仪表、控制、标识、数据处理装置及操纵人员辅助工具的尺寸、外形、颜色、布置、操作感觉及动态功能是按参考机组进行复制的。培训过程中不是操纵人员使用的控制台盘上的设备,可采用外观模拟硬件。应证实向操纵人员提供的信息的格式及单位与参考机组控制室相同。应证实明显差异已消除,或依照4.3.1.4提供的准则实施了培训需求评估。

###### 4.3.1.3 控制室环境

应证实模拟机控制室是按照3.3.1.3的要求复制参考机组控制室的。应证实明显差异已消除,或依照4.3.1.4提供的准则实施了培训需求评估。

###### 4.3.1.4 差异的评估

应对每个鉴别出的差异或明显差异进行培训需求评估。那些不影响操纵人员的操作或不分散培训注意力的差异和明显差异是可以接受的。

为鉴定差异或明显差异是否影响操纵人员的操作,宜对下列因素进行评估:

- a) 正常运行、异常运行或应急运行规程要求的人机界面;

- b) 在模拟机上与在实际控制室内执行同样操作的过程中存在的差异;
- c) 在给操纵人员的提示、听觉和视觉信息方面的差异,以及要求操纵人员进行的重要决策和操作活动的差异;
- d) 设备功能和对参考机组的安全产生影响、使参考机组跳闸或参考机组设备损坏的可能性;
- e) 正常、异常或应急操作时班组响应的差异;
- f) 分析参考机组实际运行经验,找出导致操纵人员误操作的可能性或是否有提高操纵人员岗位操作技能的必要性。

#### 4.3.2 模拟的系统及其完整性

##### 4.3.2.1 控制室内监控的系统

应证实模拟范围内的参考机组的系统足够完整,能够完成3.2.4.3所规定的正常变工况及3.2.5所规定的故障过程。应证实模拟范围包括系统与系统之间的相互作用,以给出综合的机组响应。应证实差异已消除,或依照4.3.1.4规定的准则实施了培训需求评估。

##### 4.3.2.2 控制室外监控的系统

应证实对执行3.2.4.3规定的正常变工况及3.2.5规定的故障所必需的不在控制室内监控的系统进行了模拟。应证实操纵人员能够以参考机组上相似的方式干预就地操作。应证实差异已消除,或按4.3.1.4规定的准则实施了培训需求评估。

#### 4.4 模拟机教练员站功能

##### 4.4.1 初始条件

应证实模拟机具有足够的容量存储各种初始条件。初始条件应能表征参考机组的状态并有行政管理。

##### 4.4.2 故障

应证实3.4.2中规定的能力存在。故障的引入不应以任何有别于参考机组出现故障的方式提示操纵人员将要发生的事件。

##### 4.4.3 其他功能

应证实模拟机具有3.4.3规定的功能。模拟机控制功能的执行不应提示操纵人员将要发生的事件,只有那些引起模型实时执行的背离和提示达到模拟极限的功能除外。

对于实物模拟或虚拟实物模拟的系统,应有文件证明对明显差异作了详细说明,并已按4.3.1.4的规定实施了培训需求评估。

##### 4.4.4 就地操作

应证实模拟机具有再现3.4.4和持照操纵人员培训大纲所要求的就地操作的功能。就地操作的引入不会以任何有别于参考机组就地操作的方式提示操纵人员将要发生的事件。

应证实模拟机允许教练员进行3.4.4规定的控制室以外的就地操作。

##### 4.4.5 数据采集

应证实模拟机具有电子记录选定模拟参数,并以绘图或打印输出方式提供这些参数的硬拷贝数据的能力;以及提供足够的参数精度和时间分辨率,以鉴定其符合本章中规定的测试准则的能力。

## 4.5 模拟机测试

### 4.5.1 概述

应证实完成了验证、确认和性能测试，以确保模拟机控制室和模拟的系统与参考机组控制室和系统之间不存在明显的差异。

### 4.5.2 模拟机验证测试

应证实模拟机验证测试在将新的或修改过的软件与其余用于操纵人员培训和考试的软件首次集成之前完成。应根据软件的设计特点和对模拟机逼真度的影响来确定测试的范围和类型。软件修改的测试可在非集成的环境中进行，即在一台计算机上，而不一定在模拟机上。

验证测试应作为结构化软件设计和开发过程的一个组成部分，当发生下列任何一项内容的变更或修正时，应进行验证测试：

- a) 计算机平台；
- b) 操作系统及运行实用程序；
- c) 接口系统；
- d) 教练员站；
- e) 模型。

每个模拟支持组织应保证产生必要的软件设计文档并对其升级。

### 4.5.3 模拟机确认测试

应证实通过将模拟机模型的计算结果与第3章中规定的参考机组的实际的或预计的数据相比较来完成模拟机确认测试。本章提供了确保满足这些要求的准则。模拟机确认测试可在系统的完全集成、部分集成或分调模式下实施。每个模拟支持组织应确保确认测试文档的生成。数据比较的优先次序应按5.2.1的要求进行。测试操作、结果及评估的记录应保留。

在以下情形下，应先进行确认测试，然后模拟机才能用于培训和考试：

- a) 模拟机初始建造完成时；
- b) 模型的修改或更换会影响到与参考机组有关的模拟逼真度时；
- c) 所做的一些变更，包括对计算机平台、操作系统和运行实用程序、接口系统或教练员站的变更，可能会影响到模拟机的功能或重现性时。

### 4.5.4 模拟机性能测试

#### 4.5.4.1 概述

应证实模拟机的性能测试按照以下规定实施。应保留相关测试操作以及模拟结果与实际机组数据比较的记录。

#### 4.5.4.2 模拟机可运行性测试

模拟机可运行性测试应该每个参考机组换料周期进行一次，测试要求参见附录B。模拟机可运行性测试包括以下内容：

- a) 模拟机稳态运行性能；
- b) 对应于一组基准瞬态的模拟机瞬态运行性能。

应保存测试结果及其评估的记录。附录A提供了可接受的模拟机性能测试文档的例子。

#### 4.5.4.3 模拟机基于场景的测试

模拟机基于场景的测试的目的是确保模拟机有能力产生预期的参考机组响应来满足预定的学习和考试目标。应通过利用现有的培训和考试场景确认过程来确保以下内容：

- a) 场景满足预定的学习和考试目标, 并且包括适当的教练员接口、操纵人员行为和提示;
- b) 模拟机有能力产生预期的参考机组响应, 而没有重大的性能差异或偏离核准的场景顺序。

应获取场景确认期间的测试数据, 以便于场景实现的故障、就地操作和其他功能的后续评估。测试数据的评估应考虑:

- a) 模拟机允许使用那些适用的参考机组规程;
- b) 在引入故障情况下, 模拟参数的任何可见变化趋势与参考机组相应参数的实际的或最佳估算的变化趋势相一致;
- c) 若参考机组出现报警或自动动作, 则在完全相同的状态下, 模拟机上也应出现;
- d) 若参考机组不出现报警或自动动作, 则在完全相同的状态下, 模拟机上也应不出现。

测试数据的评估结果应编成证明文件并且包括以下内容:

- a) 初始条件、场景描述和用于引起瞬态的扰动;
- b) 明确证实或直接断言满足学习和考试目标;
- c) 核对过的关键参数的列表和不存在意外变化的结论意见;
- d) 发生的关键报警和关键自动动作的列表, 以及它们对于场景是期望发生的结论意见;
- e) 没有意外报警和自动动作发生的结论意见。

#### 4.5.4.4 模拟机反应堆堆芯性能测试

参考机组的每次换料实施后, 如果反应堆堆芯性能因换料方案的改变而发生明显变化, 则应进行模拟机反应堆堆芯性能测试。测试的实施应与参考机组的规程相符合, 应通过比较来证实复制了参考机组的响应。

应证实模拟机反应堆堆芯性能测试过程中的模拟机响应满足参考机组规程的验收准则。

应保存测试结果及其评估的记录。附录A提供了可接受的模拟机性能测试文档的例子。

#### 4.5.4.5 事件后模拟机测试

当参考机组事件产生了可用于评估模拟机性能的相关数据时, 宜进行事件后模拟机测试。这种测试应:

- a) 考虑事件序列和操纵人员行为, 而且依照参考机组的规程进行测试操作;
- b) 记录事件后模拟机测试结果并比较了相关数据, 证实模拟机有能力再现模拟范围内的参考机组相关参数的响应。

### 5 模拟机的配置管理

#### 5.1 概述

应建立模拟机配置管理体系, 以提供用于验证模拟机性能和证实其符合第3章规定的方法。模拟机的配置管理体系应包括:

- a) 建立和维护模拟机设计基线的方法;
- b) 识别并记录模拟机与参考机组之间的差异及其处理结果的跟踪系统;
- c) 支持模拟机测试和维护的文件资料, 参见附录 A。

#### 5.2 模拟机设计基线



### 5.2.1 一般要求

模拟机设计基线由当前模拟机设计数据、硬件配置和软件配置组成。模拟机设计基线包括下列内容：

- a) 参考机组设计数据；
- b) 参考机组性能数据；
- c) 参考机组工程分析资料；
- d) 支持模拟机的计算和分析资料；
- e) 模拟机规格书；
- f) 设备供应商文件；
- g) 当前批准过的软件。

模拟机设计基线应包括模拟机设计所采用的完整的数据。

### 5.2.2 基线数据的利用

基线数据有多种来源，为保证模拟机的逼真度，使用该数据应遵循如下优先顺序：

- a) 直接从参考机组收集的数据；
- b) 有可靠理论依据的工程分析所产生的数据；
- c) 从与参考机组设计和运行相似的电厂收集的数据；
- d) 专家估算的数据；
- e) 上述渠道以外的数据。

对那些不是从参考机组获得的数据，应专门标明数据的来源，并指出其在模拟机上的适用性。

### 5.2.3 模拟机设计数据库的更新

#### 5.2.3.1 概述

模拟机设计数据库应按照5.2.3.2和5.2.3.3规定进行定期更新，以纳入参考机组的新数据。

#### 5.2.3.2 首次更新

在参考机组商业运行后的18个月内或模拟机运行后的18个月内（取时间居后者），应对新数据进行可用性评审并决定是否对模拟机进行修改。

#### 5.2.3.3 后续更新

首次更新后，应每年对新数据进行审核，并适当地修订模拟机设计数据库。应对参考机组的所有变更进行分析审核，并决定在参考机组实施变更后的12个月内是否对模拟机作相应的修改。

### 5.3 模拟范围的修订

改变模拟机设计基线可能影响模拟范围。宜主要以培训需求评估为依据确定是否需要实施相关的修改。

模拟机的修改，包括对已甄别性能差异的消除，应在结构化设计和测试过程的背景下实施。

### 5.4 模拟机的变更

#### 5.4.1 概述

模拟机变更分为以下两大类：

- a) 根据参考机组的修改进行的变更；
- b) 根据最新的机组性能数据、学员反馈、事件报告和模拟机性能测试结果等进行的变更。

在培训需求评估的基础上，上述两类变更均可在参考机组的实际修改之前进行，例如，控制盘的修改，新燃料的装载。

#### 5.4.2 基于参考机组修改的模拟机变更

##### 5.4.2.1 概述

在5.4.2.2和5.4.2.3的情况下，应对模拟机的配置进行升级以保持其与参考机组的一致性。

##### 5.4.2.2 首次升级

与操纵人员培训大纲有关的参考机组的修改，应在参考机组商业运行后的30个月内或模拟机运行后的30个月后（取时间居后者）在模拟机上实施。如果培训需求评估表明的确需要，模拟机修改应提前实施。

##### 5.4.2.3 后续升级

首次升级之后，与操纵人员培训大纲有关的参考机组的修改，应在参考机组修改实施后的24个月内在模拟机上实施。如果培训需求评估表明的确需要，模拟机修改应提前实施。

#### 5.4.3 基于性能的模拟机变更

应对最新的参考机组性能数据、学员反馈、模拟机性能测试结果、参考机组堆芯换料情况和运行事件报告进行培训需求评估，并根据其对操纵人员培训大纲的影响程度，在模拟机上作相应的变更。

#### 5.5 软件和硬件的配置管理

应按照4.5的要求对操纵人员培训和考试所使用的软件和硬件的配置进行管理。

附录 A  
(资料性附录)  
模拟机设计和测试文件编制导则

A.1 目的

本附录提供了用于证实模拟机符合本标准的一种可接受的文件格式。文件的覆盖范围应满足模拟机性能验证、配置管理和维护的需要。电子介质文件是一种维护文档的合适方法。下面为模拟机文档的典型组成部分。

A.2 模拟机信息

A.2.1 概述

本章提供特定模拟机的一般情况，以及作为操纵人员培训和考核工具的基本适用性的说明。

A.2.2 模拟机

模拟机包括以下内容：

- a) 业主、用户和制造厂家；
- b) 参考机组名称、类型和额定功率；
- c) 模拟机投运日期。

A.2.3 模拟机控制室

一份记录模拟机控制室与参考机组控制室差异的报告，包括全部差异的处理说明。

A.2.4 教练员站

教练员站包括以下内容：

- a) 带描述的初始条件清单；
- b) 有严重程度、原因和立即效应说明的故障清单；
- c) 就地操作功能清单；
- d) 模拟极限清单及超越此极限时提醒教练员的方法的说明；
- e) 其他功能的清单。

A.2.5 运行规程

模拟机运行规程与参考机组运行规程间的差异说明。

A.2.6 报告和记录

记录模拟机首次符合本标准 and 后续升级的情况。

A.3 模拟机设计数据

A.3.1 应有一整套模拟机的设计数据，可以按其功能将设计数据进行分类。对来自参考机组以外的数据应专门说明其出处及在参考机组上的适用性。

A.3.2 确定模拟范围的一些模拟机设计数据举例如下：

- a) 管线和仪表流程图；
- b) 控制及逻辑系统图；
- c) 仪控原理图；
- d) 配电系统；
- e) 仪表用压缩空气分配图；
- f) 报警手册；
- g) 电厂计算机手册；
- h) 参考机组控制室资料；
- i) 仪表和控制清单；
- j) 控制室台盘布置。

A.3.3 确定模拟机运行特性的一些模拟机设计数据举例如下：

- a) 堆芯核物理数据；
- b) 升温数据；
- c) 设备运行特性；
- d) 控制整定值手册；
- e) 技术手册。

A.3.4 确认模拟机运行性能的一些模拟机设计数据举例如下：

- a) 瞬态数据；
- b) 最佳估算瞬态数据；
- c) 运行规程；
- d) 安全分析报告；
- e) 观察到的运行过程；
- f) 启动试验。

## A.4 模拟机文件

### A.4.1 概述

宜管理和维护下列专门的模拟机文件。

### A.4.2 模拟系统的文件

此文件提供了每个所模拟的系统模型的详细设计资料，如模拟图、数学模型说明、假设、简化等等。

### A.4.3 模拟软件源程序

模拟软件源程序作为一种文件，应有行政管理措施对其进行更新，并有详细说明。

### A.4.4 模拟机硬件文件

模拟机硬件文件应能够有效地支持设计管理和维护工作。硬件文件包括硬件设备清册、备品备件清册、接线清单、配电系统图、模拟机硬件设计文件、特殊线路、实施的仪控修改等等。

## A.5 模拟机测试文件

模拟机性能准则和模拟机测试文件应包括下列基本信息：

- a) 初始条件；
- b) 触发瞬态的扰动，如故障、就地操作和操纵人员的行为；
- c) 模拟机上相关的参数响应；
- d) 测试结果的评价和确认；
- e) 有关文件的更新。



附 录 B  
(资料性附录)  
模拟机可运行性测试实施导则

### B.1 目的

本附录提供了用于演示模拟机可运行性的测试项目、需记录的参数和时间分辨率的范例，说明了4.5.4.2要求的模拟机可运行性测试的范围及目的。

### B.2 可运行性测试分类

#### B.2.1 概述

应当针对稳态和瞬态的测试编制正式的测试规程，并制定与4.5一致的可运行性确认的验收准则。

#### B.2.2 稳态测试

通过对模拟机与参考机组之间参数的比较，验证可接受的稳态响应。比较应在有完整热平衡数据的三个稳态功率水平上进行，三个功率水平的跨度至少为运行量程的50%。B.3列出了需要监视的参数清单，验收准则见4.2.3.2。

#### B.2.3 瞬态测试

通过对瞬态事件进行测试，观察B.3所列参数的变化。瞬态事件通常由故障引入，但瞬态测试的目的是验证模拟机的响应，而非测试故障。验收准则见4.2.4。

### B.3 压水堆模拟机可运行性测试要求

#### B.3.1 稳态测试参数

稳态测试参数包括：

- a) 反应堆冷却剂平均温度；
- b) 反应堆冷却剂环路热段温度；
- c) 反应堆冷却剂环路冷段温度；
- d) 发电机功率；
- e) 核功率；
- f) 功率量程指示；
- g) 反应堆冷却剂系统压力；
- h) 蒸汽发生器压力；
- i) 稳压器液位；
- j) 蒸汽发生器给水流量；
- k) 反应堆冷却剂系统流量；
- l) 安全壳压力；
- m) 蒸汽发生器水位；

- n) 上充流量;
- o) 下泄流量;
- p) 主蒸汽流量;
- q) 汽轮机冲动级压力;
- r) 硼浓度;
- s) 稳压器温度;
- t) 控制棒棒位;
- u) 二回路热平衡数据。

### B.3.2 瞬态性能测试

B.3.2.1 在100%额定功率、平衡氙(Xe)和衰变热的初始条件下,运行下列瞬态(除注明外,均为操纵人员不干预的过程):

- a) 手动紧急停堆;
- b) 同时停止全部主给水泵;
- c) 同时关闭全部主蒸汽隔离阀;
- d) 同时停止全部反应堆冷却剂泵;
- e) 停止一台反应堆冷却剂泵;
- f) 允许最大功率下汽轮机紧急停机而不导致紧急停堆;
- g) 最大速率线性降升功率(反应堆功率从100%降至75%,然后又回到100%);
- h) 反应堆冷却剂系统最大尺寸破口,伴随失去全部厂外电源;
- i) 不可隔离的主蒸汽管道最大尺寸的破口;
- j) 稳压器卸压阀或安全阀卡开,使反应堆冷却剂系统缓慢卸压至饱和状态(闭锁高压应急堆芯冷却系统的启动);
- k) 甩最大设计负荷。

B.3.2.2 对于B.3.2.1中的a)~d)、f)、g)和k)的瞬态过程,以1s或更短的时间分辨率,同时记录下列参数:

- a) 核功率(%);
- b) 反应堆冷却剂平均温度;
- c) 稳压器压力;
- d) 稳压器液位;
- e) 稳压器温度;
- f) 蒸汽总流量(若有监测);
- g) 给水总流量(若有监测);
- h) 反应堆冷却剂热段温度(任一环路);
- i) 反应堆冷却剂冷段温度(同一环路);
- j) 蒸汽发生器二次侧压力(同一环路);
- k) 蒸汽发生器水位(同一环路)。

B.3.2.3 对于B.3.2.1中的e)瞬态过程,以1s或更短的时间分辨率,同时记录下列参数:

- a) 核功率(%);
- b) 反应堆冷却剂环路热段温度;
- c) 反应堆冷却剂环路冷段温度;
- d) 蒸汽发生器二次侧压力;
- e) 蒸汽发生器水位;

- f) 蒸汽发生器蒸汽流量;
- g) 蒸汽发生器给水流量;
- h) 反应堆冷却剂系统流量。

B.3.2.4 对于B.3.2.1中的h)和i)瞬态过程,以1s或更短的时间分辨率,同时记录下列参数:

- a) 稳压器压力;
- b) 稳压器窄量程压力;
- c) 稳压器液位;
- d) 安全壳压力;
- e) 安全壳温度。

B.3.2.5 对于B.3.2.1中的j)瞬态过程,以1s或更短的时间分辨率,同时记录下列参数:

- a) 卸压阀流量(若有监测);
- b) 稳压器压力;
- c) 稳压器温度;
- d) 稳压器液位;
- e) 反应堆冷却剂流量;
- f) 稳压器波动管温度;
- g) 反应堆冷却剂热段温度(波动管所在环路);
- h) 源量程指示;
- i) 反应堆压力容器液位指示(若有监测);
- j) 反应堆冷却剂过冷度(若有监测)。



附 录 C  
(资料性附录)  
模拟机稳态允许误差应用范例

C.1 范例 1

按4.2.3.2的规定, 参数允许误差为1%。

反应堆冷却剂系统压力: 11.000MPa~20.000MPa;

测量量程:  $20.000\text{MPa} - 11.000\text{MPa} = 9.000\text{MPa}$ ;

仪表误差: 0.5%(取自重要仪表标定数据清单);

在所有功率水平上压力指示为: 15.2MPa;

因此应用到模拟机上的误差为:

$9.000\text{MPa} \times (1\% + 0.5\%) = 0.135\text{MPa}$ ;

允许最大指示为:  $15.200\text{MPa} + 0.135\text{MPa} = 15.335\text{MPa}$ ;

允许最小指示为:  $15.200\text{MPa} - 0.135\text{MPa} = 15.065\text{MPa}$ 。

C.2 范例 2

按4.2.3.2的规定, 参数允许误差为1%。

反应堆冷却剂环路热段温度:  $260.00^\circ\text{C} \sim 350.00^\circ\text{C}$ ;

测量量程:  $350.00^\circ\text{C} - 260.00^\circ\text{C} = 90.00^\circ\text{C}$ ;

仪表误差: 0.5%(取自重要仪表标定数据清单);

在某一功率水平上热段温度指示为:  $300.00^\circ\text{C}$ ;

因此应用到模拟机上的误差为:

$90.00^\circ\text{C} \times (1\% + 0.5\%) = 1.35^\circ\text{C}$ ;

允许最大指示为:  $300.00^\circ\text{C} + 1.35^\circ\text{C} = 301.35^\circ\text{C}$ ;

允许最小指示为:  $300.00^\circ\text{C} - 1.35^\circ\text{C} = 298.65^\circ\text{C}$ 。

本附录参数及数据取自秦山300MW压水堆核电机组。

附 录 D  
(资料性附录)

本标准与 ANSI/ANS-3.5—2009 的主要技术差异及其原因

表D. 1给出了本标准与ANSI/ANS-3.5—2009的主要技术性差异及其原因的一览表。

表 D. 1 本标准与 ANSI/ANS-3.5—2009 的主要技术性差异及其原因

本标准的章条编号	技术性差异	原因
2	本标准参考 IAEA-TECDOC-1500, 增加了“模拟”、“实物模拟”和“虚拟实物模拟”的定义	随着数字化控制系统在核电厂的普及应用, 相应出现了新的模拟方法。对各种模拟方法予以明确定义是必要的
3.2.5	本标准细化了电厂输配电系统故障的内容	根据国内模拟机培训的经验反馈进行了细化, 以满足操纵人员的培训需求
3.3.1.1	本标准明确要求模拟辅助控制室	根据 IAEA、WANO 等机构在国内核电站进行同行评估的建议, 明确要求模拟辅助控制室
3.4.3	本标准增加了对“虚拟实物模拟”系统的功能要求	考虑到“虚拟实物模拟”系统在模拟机中的应用日益增加
4.4.3	本标准增加了对“虚拟实物模拟”系统的测试要求	与3.4.3的内容相呼应
4.5.4.4	本标准对实施模拟机反应堆堆芯性能测试的必要前提条件作了说明	使相关规定更易于执行

### 参 考 文 献

- [1] IAEA-TECDOC-1500 Guidelines for upgrade and modernization of nuclear power plant training simulators
-

中 华 人 民 共 和 国  
能 源 行 业 标 准  
核电厂操纵人员培训及考试用模拟机  
NB/T 20015-2010

\*

原子能出版社出版  
核工业标准化研究所发行  
北京海淀区骚子营 1 号院  
邮政编码：100091  
电 话：010-62863505  
总装备部军标出版发行部印刷车间印刷  
版权专有 不得翻印

\*

2010 年 10 月第 1 版 2010 年 10 月第 1 次印刷  
印数 1—200