

申报编号：2023-210762

# 第三批国家级一流本科课程申报书

## (虚拟仿真实验教学课程)

课程名称：核电站反应堆启停运行控制虚拟仿真  
实验

专业类代码：0822

负责人：林萌

联系电话：13916629484

申报学校：上海交通大学

填表日期：

推荐单位：上海交通大学

中华人民共和国教育部制

二〇二三年十一月

---

## 填报说明

1.专业类代码指《普通高等学校本科专业目录（2022）》中的专业类代码（四位数字）。

2.文中○为单选；□可多选。

3.团队主要成员除主讲教师外，可以包含一位确实发挥重要支持作用的技术人员，并在“承担任务”栏中说明属于技术人员。

4.文本中的中外文名词第一次出现时，要写清全称和缩写，再次出现时可以使用缩写。

5.具有防伪标识的申报书及申报材料由推荐单位打印留存备查，国家级评审以网络提交的电子版为准。

6.涉密课程或不能公开个人信息的涉密人员不得参与申报。

## 1. 基本情况

实验名称	核电站反应堆启停运行控制虚拟仿真实验		是否曾被推荐	○是●否	
实验负责人	林萌				
负责人所在单位	上海交通大学				
是否国家级一流本科专业建设点	●是○否	(如是) 专业名称	核工程与核技术	专业代码	082201
实验所属课程(可填多个)	核工程综合设计与实践、核电厂系统与运行原理				
性质	○独立实验课 ●课程实验				
实验对应专业	核工程与核技术				
实验类型	○基础练习型 ○综合设计型 ●研究探索型 ○其他				
虚拟仿真必要性	<input checked="" type="checkbox"/> 高危或极端环境 <input checked="" type="checkbox"/> 高成本、高消耗 <input checked="" type="checkbox"/> 不可逆操作 <input checked="" type="checkbox"/> 大型综合训练				
实验语言	●中文 ○中文+外文字幕(语种) ○外文(语种)				
实验已开设期次	共 6 次: 1. 2023-03-08 ~ 2023-04-12、35 人 2. 2022-04-20 ~ 2022-06-01、39 人 3. 2021-02-22 ~ 2021-05-14、40 人 4. 2020-03-04 ~ 2020-05-20、28 人 5. 2019-03-25 ~ 2019-06-15、32 人 6. 2018-03-05 ~ 2018-06-08、23 人				

## 2. 课程团队情况

2-1 课程团队主要成员(序号1为课程负责人,总人数限5人以内)								
序号	姓名	出生年月	单位	职务	职称	手机号码	电子邮箱	承担任务
1	林萌	1978-11-20	上海交通大学	副院长	副教授	13916629484	linmeng@sjtu.edu.cn	总体负责,主讲

			大学					教师
2	杨燕华	1962-03-06	上海交通大学	教师	教授	13917602102	yanhuay@sjtu.edu.cn	课程发展指导
3	刘鹏飞	1977-12-07	上海交通大学	教师	讲师	13816619965	pfliu@sjtu.edu.cn	实验操作指导
4	熊珍琴	1982-04-07	上海交通大学	教师	副教授	13818729618	zqxiong@sjtu.edu.cn	教学管理
5	王旭	1990-10-10	上海氩钨钨科技有限公司	研发主管	工程师	13681895145	wangxu@nures.com.cn	技术人员

2-2 团队主要成员教学情况（限 500 字以内）

（近 5 年来承担该实验教学任务情况，以及负责人开展教学研究、学术研究、获得教学奖励的情况）

实验教学任务

负责人 2019-2023 年承担本实验课程累计 120 学时

#### 教学研究

2023 年《核反应堆安全分析》上海交通大学课程思政建设项目

#### 学术研究

- 1)2023 年，基于人工智能的核动力系统故障诊断技术研究，十三五核能开发项目，项目负责人
- 2)2020 年，全范围模拟机自主化核心技术研究，国家科技重大专项，项目总体技术负责人，子课题负责人
- 3)2023 年，海洋核动力系统运行特性与先进控制技术研究，中核领创项目，项目负责人
- 4)2021 年，模拟机耦合平台开发，中国核动力研究设计院课题，项目负责人
- 5)2020 年，反应堆启堆智能控制技术及建模仿真演示研究，中国核动力研究设计院课题，项目负责人

#### 教学奖励

- 1)2020 年，上海交通大学“教书育人奖”（个人奖），提名奖
- 2)2021 年，上海交通大学“烛光奖”教师奖，二等奖
- 3)2022 年，上海市高等教育优秀教学成果二等奖，“面向核能强国，探索核工程与核技术专业多层次全产业链实践育人模式”
- 4)2021 年，上海交通大学教学成果二等奖，“以产出为导向的核工程与核技术专业多层次实践教学创新模式”

### 3. 实验描述

#### 3-1 实验简介（实验的必要性及实用性，教学设计的合理性，实验系统的先进性）

反应堆运行控制是核电站工程的核心问题之一，是核工程专业学生必须学习的知识和技能。反应堆操纵人员培训是核电厂运行和管理的一个重要环节，根据核安全相关法规规定，反应堆必须由被认可且经授权的人员操作。核电站系统复杂、运行控制要求高、有放射性辐照风险等，同时现场设备安全可靠，很少出现事故和故障，运行人员很难获得事故处理实际操作的感性认识。因此，通过核电站模拟仿真系统培训提高运行人员解决问题的能力非常有必要。

核电站反应堆启停运行控制虚拟仿真实验教学设计可与核工程与和技术专业的多门课程相结合。本虚仿实验利用核电站模拟机仿平台软件，实施核电厂反应堆启停运行控制操作；通过完成核电厂满功率稳态运行、核电厂满功率甩负荷至孤岛运行、核电厂满功率运行正常降功率至热停堆及以下运行、核电厂热停堆至反应堆临界至反应堆热备用运行、反应堆热备用运行至反应堆满功率运行等多工况运行控制实验，认识和学习核电厂系统组成、系统功能、运行控制原理。针对《核电厂系统与设备》课程，通过动态人机画面展示系统流程、设备运行状态参数、操作控制过程等，帮助学生动态理解并掌握相关系统设备作用。针对《核电厂运行与控制》课程，可进行核电厂稳态及瞬态运行控制相关教学，包括反应堆功率控制、反应堆平均温度控制、稳压器压力控制、稳压器水位控制、蒸发器液位控制、蒸汽排放控制、汽轮机控制等核岛及常规岛主要控制系统。针对《核反应堆物理》课程，通过反应堆启停控制棒动作、瞬态工况下功率控制变化等实践帮助学生理解核反应堆中子动力学行为。针对《核反应堆安全分析》课程，可进行如主泵失电等典型事故演示教学，让学生能够从真实的核电厂运行视角理解核反应堆的安全保护设计与分析。本虚仿实验将反应堆热工物理、系统设备、运行控制、事故操作等多课程知识进行了融合实践，可培养学生的综合知识运用能力，为今后从事核工程行业打下基础。

本虚仿实验将高精度核电厂工程模拟机用于虚拟仿真教学，直接提高了课程质量。核电厂工程模拟机一般主要用于设计验证、操作培训等工程使用，有复杂仿真模型、高计算精度和逼真监控画面。将工程模拟机经过一定改造后用于高校虚拟仿真实验，与实际工程现场结合紧密，非常有益于核工程专业的学生学习，教学效果好。虚拟对象是百万千瓦级以上压水堆核电站，可进行稳态、甩负荷瞬态、满功率到冷停堆的上下行过程运行控制；模拟仿真操作虽进行了一定简化，但基本与实际核电机组操作原理保持一致。通过本虚仿实验的实施，既可避免实际反应堆安全及辐照等风险，又可通过实践增加核工程类学生的兴趣、加深理论知识运用、提高运行操作实践能力，是先进又实用的虚仿实验。

### 3-2 实验教学目标（实验后应该达到的知识、能力水平）

通过核电站反应堆启停运行控制虚拟仿真实验，达到如下目标：

- 1) 通过基础原理视频学习，了解核电厂仿真方法及仿真对象的组成；
- 2) 通过稳态运行实验，熟悉百万千瓦级以上核电机组一二回路主要系统流程及重要系统参数；
- 3) 通过反应堆启停运行控制实验，掌握核电站反应堆启停过程的基本方法和步骤；
- 4) 通过整个稳态和瞬态运行控制实验，加深对于核电站主要控制系统的理解，能够将控制系统与瞬态工况相结合用于运行分析。

### 3-3 实验课时

(1) 实验所属课程课时：64 学时

(2) 该实验所占课时：12 学时

### 3-4 实验原理

(1) 实验原理(限 1000 字以内)

本实验内容涉及了核电站主要系统设备组成、反应堆中子动力学、传热与流动、自动控制、协调运行等原理。

核电站实现了从核能到电能的转化，它是由多个复杂系统及设备组合而成，各自完成不能的功能。实验中通过二维系统流程图的方式将核电站一二回路主系统的主体流程与设备进行了展示，通过不同系统接口图符及页面跳转表达各系统间的连接关系，通过各系统主要参数的动态变化展示系统运行特性。

反应堆物理部分采用了两群六组缓发中子的点堆中子动力学模型模拟反应堆中子裂变及衰变过程产生的能量，模型并带有冷却剂密度反馈、燃料温度反馈、硼浓度反馈等，从而可以仿真核电厂核反应堆功率的动态变化，体现了反应堆物理的基本原理。

反应堆热工水力部分采用了一维两流体六方程的流体力学系统瞬态分析程序以及一维固体导热瞬态分析程序模拟核电厂一二回路主系统的热力循环过程，包括：裂变产生的热量经燃料棒导热及对流换热传递至流经堆芯的冷却剂水，再通过一回路冷却剂循环流动将热量传递至蒸汽发生器；二回路工质水经蒸汽发生器传热管导热及对流换热后产生蒸汽，蒸汽流动至汽轮机中做功，带动发电机转为电能；乏汽经冷凝器冷却和多级回热后重新回到蒸汽发生器的整个热力循环过程。实验通过系统流量、温度、压力等热工水力参数的动态展示，体现了流体力学、传热学、工程热力学的基本原理。

核电站控制部分采用了信号输入输出、比例积分微分、滤波器、超前滞后、阈值比较器、函数发生器、手自动控制切换等基础控制逻辑算法模块搭建了反应堆功率控制、反应堆平均温度控制、稳压器压力控制、稳压器水位控制、蒸发器液位控制、蒸汽排放控制、汽轮机控制等核岛及常规岛主要控制系统，并与核电厂设备对象进行了闭环耦合，从而实现控制核电站主要系统的运行状态，体现了自动控制的基本原理。

核电站由各复杂工艺系统组合而成，系统的运行需要协调控制，本虚仿实验按照与实际核电厂非常接近的协调控制方法和步骤实现反应堆启停上下行过程的自动控制，体现了核电厂复杂工艺系统综合协调运行控制的基本原理。

知识点：共 5 个

1. 核电厂一二回路主系统流程、设备组成和基本运行特性。
2. 核反应堆中子动力学知识，如中子通量、核功率与反应性的关系等。
3. 核反应堆热工水力知识，如流体动力学、固体瞬态导热、对流换热等。
4. 核反应堆自动控制系统知识，包括反应堆功率控制、反应堆平均温度控制、稳压器压力控制、稳压器水位控制、蒸发器液位控制、蒸汽排放控制等。
5. 核反应堆启停协调运行控制知识，启停工况包括核电厂满功率稳定运行、正常降功率至热停堆运行、热停堆至冷停堆运行、冷停堆至热停堆运行、反应堆达临界、反应堆临界至功率运行。

(2) 核心要素仿真设计（对系统或对象的仿真模型体现的客观结构、功能及其运动规律的实验场景进行如实描述，限 500 字以内）

#### 1. 基于中子动力学的反应堆启停仿真

核电厂启停最重要环节是反应堆达临界以及升降功率，采用两群六组缓发中子点堆中子动力学程序模拟反应堆物理过程，通过移动控制棒模拟反应堆中子通量上涨达到临界以及后续核功率动态升降的仿真；同时考虑冷却剂密度、燃料温度等反馈，体现升降功率过程中温度等变化带来的反应堆功率变化特性。

#### 2. 基于流体力学及传热学的核电厂一二回路主系统热工水力仿真

核电厂启停过程另一重要环节是与核功率相匹配的核电厂一二回路主系统流动传热及做功过程，通过仿真程序的流体力学及传热学计算，以动态流程图形式展示流量、温度、压力等参数，体现核电厂从反应堆产生热量、经冷却剂系统传递到蒸发器、二次侧蒸汽将能量传递到汽轮机做功、经冷凝器及多级回热后的能量传输及转化过程，体现流体力学、传热学、工程热力学与工程实践的结合。

#### 3. 基于对象模型的核电厂控制系统闭环动态仿真

核电厂运行状态与控制系统密不可分，通过反应堆功率、平均温度、稳压器压力、稳压器水位、蒸发器液位、蒸汽排放控制等闭环动态仿真，实现运行工况转变过程中控制逻辑与被控对象的动态耦合特性，充分体现经典自动控制理论与核反应堆工程的结合。



### 3-5 实验教学过程与实验方法

#### 实验教学过程

##### 1. 网站视频教学

1 原理部分视频讲解，学生观看自我学习理论部分。通过录制视频讲解方式，解释核电厂仿真原理、核电厂全范围模拟机系统组成、核电厂系统模拟方法，让学生明白核电站虚拟仿真的原理；

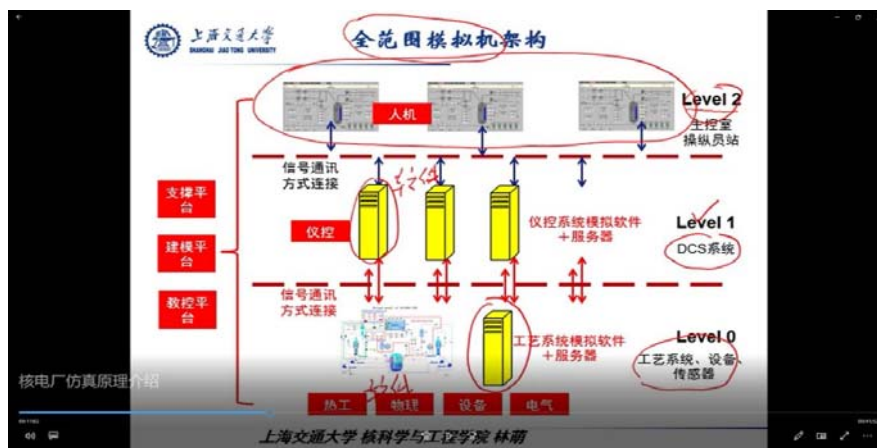


图 仿真原理视频讲解

1 操作方法及步骤视频讲解，学生观看学习怎么使用软件和操作。由于软件使用和操作步骤较为复杂，通过录制详细视频讲解主要的使用方法和操作步骤，学生通过视频自我学习如何使用和进行实验的主要操作。

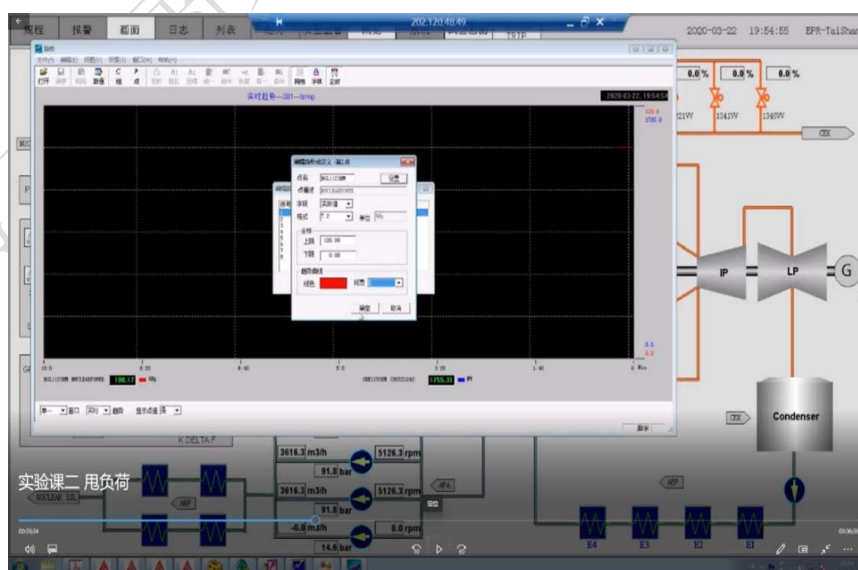


图 操作方法及步骤视频讲解

## 2. 远程上机实验操作

1 学生通过远程方式上机实践。学生通过视频学习在掌握上述软件使用与操作的基础上，根据实验大纲要求自行通过远程方式登录服务器进行上机操作实践，按要求完成实验内容。

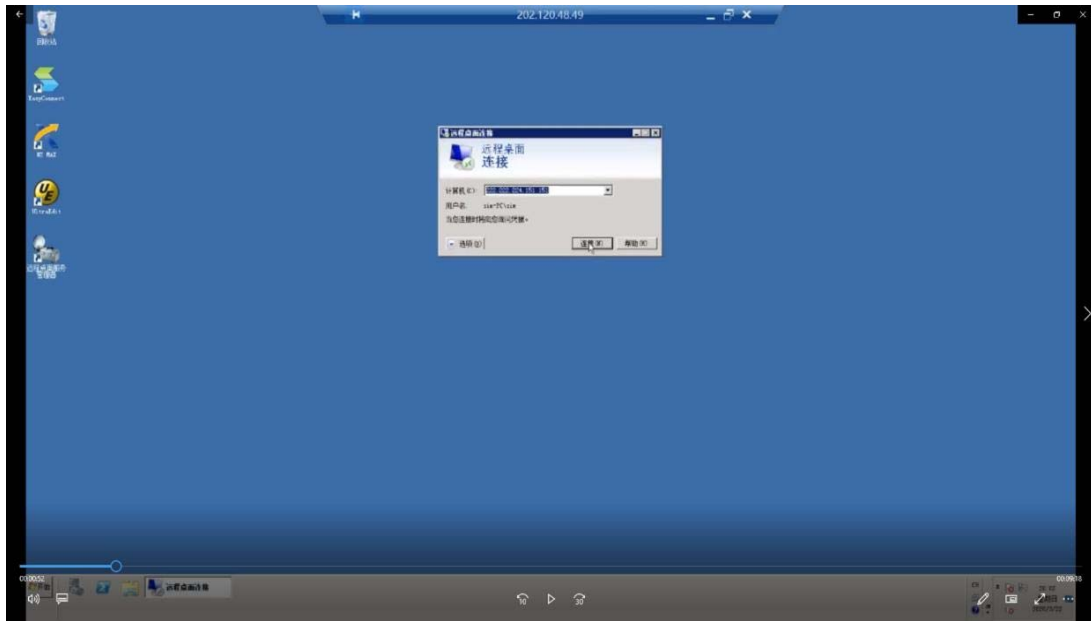


图 远程桌面登录服务器

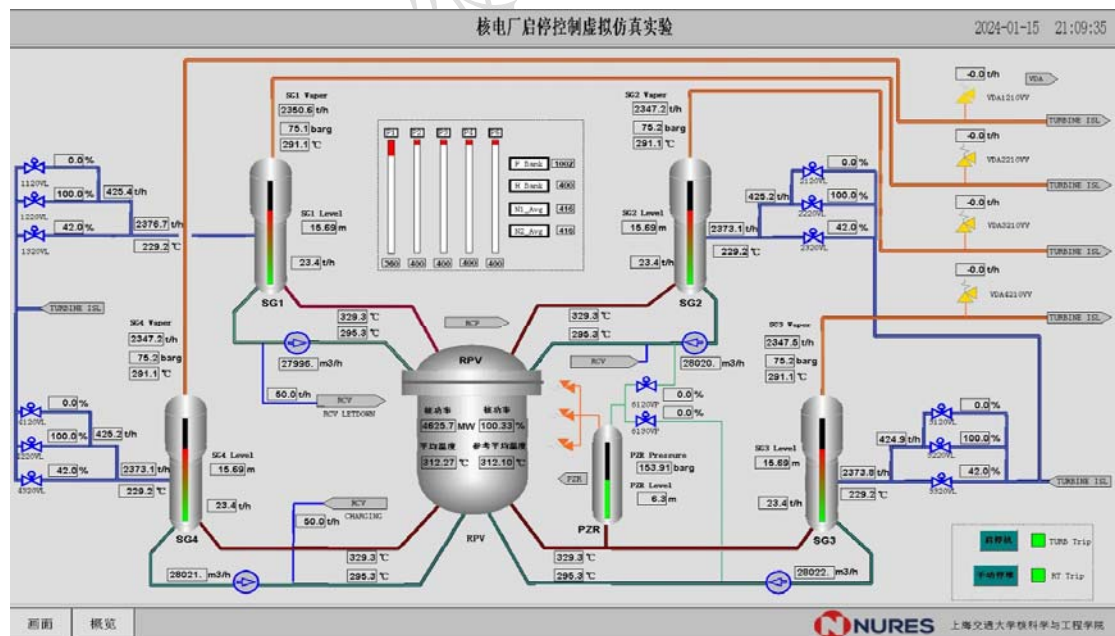


图 在远程服务器上上进行上机操作

## 3. 撰写实验报告并上传

1 完成实验后，记录实验数据，撰写报告并上传

# 核科学与核技术实验

## 实验报告

实验名称: 核电厂运行与控制仿真

指导老师: 林萌

姓 名: 郑一、陈佳鹏

学 号: 519020910104、519020910099

班 级: F1902005、F1902005

上海交通大学 核科学与工程学院

2023 年 4 月 21 日

图 实验报告

### 实验方法

1. 上机操作实验 1: 核电厂满功率稳态运行实验; 熟悉和记录稳态运行参数, 观察和学习核电厂主要系统的流程及重要设备组成。
2. 上机操作实验 2: 核电厂满功率甩负荷至孤岛运行瞬态实验; 结合核电厂反应堆功率控制系统、稳压器压力控制系统、稳压器水位控制系统、蒸发器液位控制系统、蒸汽旁路排放控制系统等, 对整个瞬态过程进行记录与分析。
3. 上机操作实验 3: 核电厂满功率运行正常降功率至热停堆及以下运行实验; 理解、认知和实践汽轮机的停闭控制、主要系统的过程切换以及反应堆控制棒的控制。
4. 上机操作实验 4: 核电厂热停堆运行至反应堆临界至反应堆热备用运行实验; 结合反应堆物理相关知识, 理解、认知和实践知反应堆控制棒动作对于中子通量变化的影响。
5. 上机操作实验 5: 反应堆热备用运行至反应堆满功率运行实验; 理解、认知和实践汽轮机的启动控制、以及功率水平运行状态下堆跟机的自动控制过程。

3-6 步骤要求（不少于 10 步的学生交互性操作步骤。操作步骤应反映实质性实验交互，系统加载之类的步骤不计入在内）

(1) 学生交互性操作步骤，共 12 步

步骤序号	步骤目标要求	步骤合理用时	目标达成度赋分模型	步骤满分	成绩类型
1	熟悉软件的使用、加载满功率工况点并观察重要参数	30	以实验报告中记录的满功率稳态数据值是否与参考值接近作为评分标准	5	<input type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
2	断开超高压断路器触发甩负荷瞬态，自行选择某一重要控制系统（如功率控制），记录相关重要参数变化并分析该系统响应。	30	以实验报告中记录的所选控制系统相关参数曲线是否正确及结合控制系统进行的分析作为评分标准	10	<input type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
3	在二回路主画面或者 GRE 负荷控制画面设定目标负荷和降负荷速率，线性降负荷到 25%。	60	以实验报告中记录的电功率及核功率等相关参数曲线是否正确作为评分标准	5	<input type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
4	继续降负荷至 88MW，核功率由 ACT 维持在 25%Pn，进行汽机跳闸与电网解列操作。	30	以实验报告中记录的电功率及核功率等相关参数曲线是否正确作为评分标准	10	<input type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
5	核功率切换	30	以实验报告中	10	<input type="checkbox"/> 操作成绩

	到 NF 控制，在 NF 控制页面操作，设定目标核功率到 5%Pn。		记录的核功率等相关参数曲线是否正确作为评分标准		<input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
6	控制核功率到 4%Pn 附近，将 SG 的液位控制切换到 VLLCV 控制	10	以实验报告中记录的核功率、蒸发器液位等相关参数曲线是否正确作为评分标准	5	<input type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
7	退出 NF 控制，手动控制插棒，全插 P 棒和 H 棒	60	以实验报告中记录的核功率、控制棒棒位等相关参数曲线是否正确作为评分标准	10	<input type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
8	全提 N1/N2 停堆棒，全提 H 棒，手动缓慢提升 P 棒使得反应堆临界，ADG 由 SVA 控压切换到 VPU 控压。	60	以实验报告中记录的核功率、反应性等相关参数曲线是否正确作为评分标准	10	<input type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
9	手动提升一回路功率，4%左右时候，给水由 AAD 切换到 APA	30	以实验报告中记录的核功率、蒸发器液位等相关参数曲线是否正确作为评分标准	5	<input type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
10	手动提升核功率到 10%Pn 左右，投入 NF 控制到 25%Pn，或者直接手动提升到 25%Pn，然	60	以实验报告中记录的核功率、冷却剂平均温度等相关参数曲线是否正确作为评分标准	10	<input type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告

	后投入 ACT 控制。				
11	启动汽轮机至并网状态	60	以实验报告中记录的汽轮机转速、电功率等相关参数曲线是否正确作为评分标准	10	<input type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
12	设定目标负荷，设定升负荷速率，汽机负荷闭环自动控制模式投入。核功率 30% 的时候启动第二台 APA 给水泵，核功率 60% 的时候启动第三台 APA 给水泵，核功率 50% 的时候启动第二台 CEX 冷凝泵。	60	以实验报告中记录的核功率、电功率等相关参数曲线是否正确作为评分标准	10	<input type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告

## (2) 交互性步骤详细说明

如下为主要的交互性步骤操作详细说明，更为具体的操作说明请查看视频以及操作步骤说明文档

### 步骤 1 满功率稳态运行实验观察

加载核电站 100% 满功率初态，观察和记录稳态运行参数，学习主要系统流程及重要设备组成。

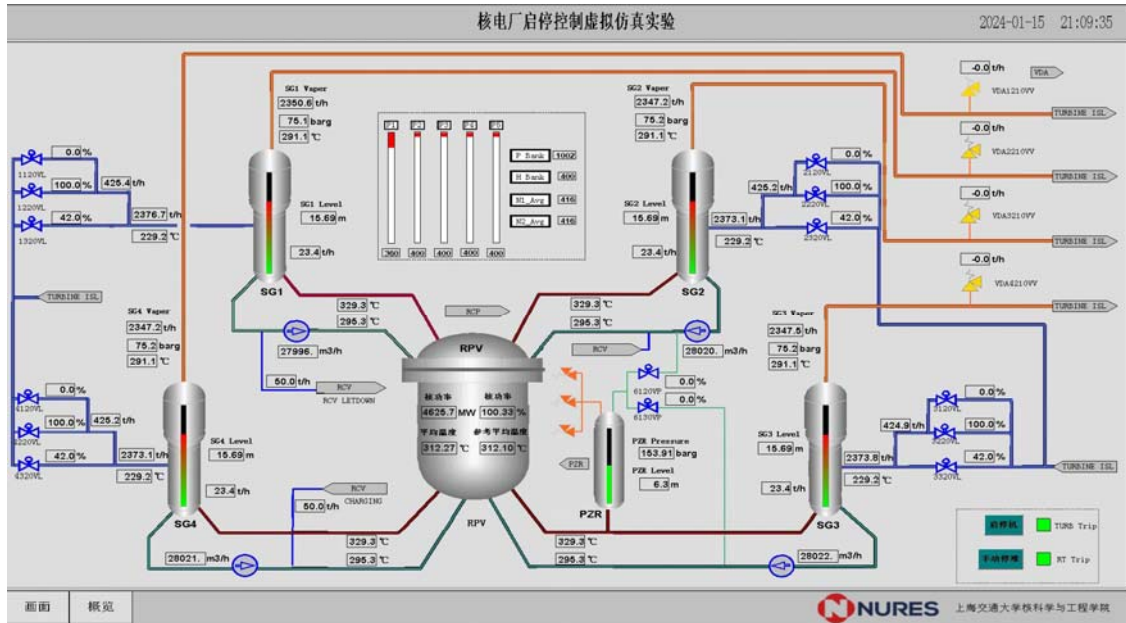


图 核电站满功率初态操作画面

步骤 2 甩负荷实验触发及实验观察

在 100%满功率初态基础上，断开两个超高压断路器触发正常满功率甩负荷至厂用电运行。

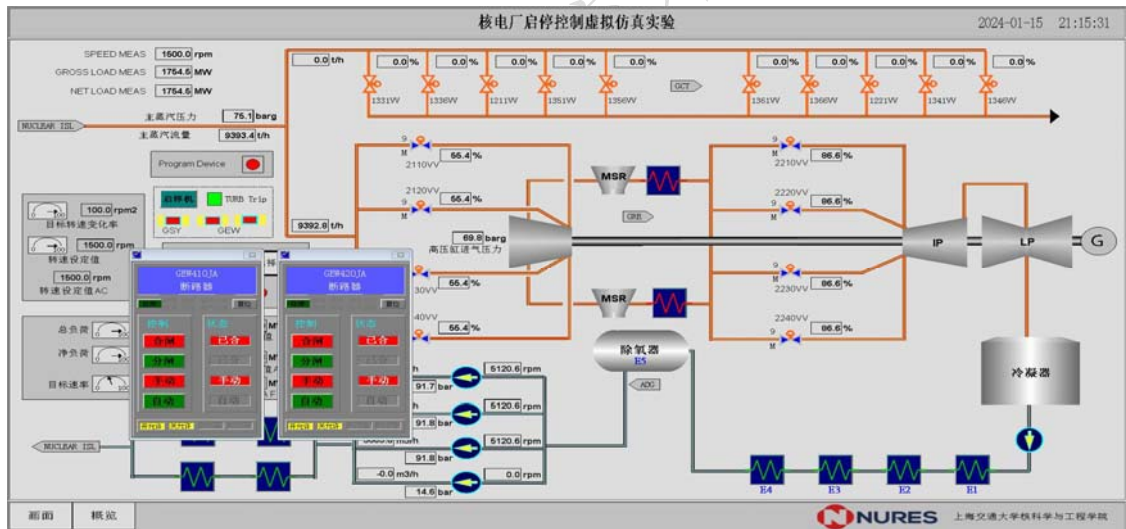


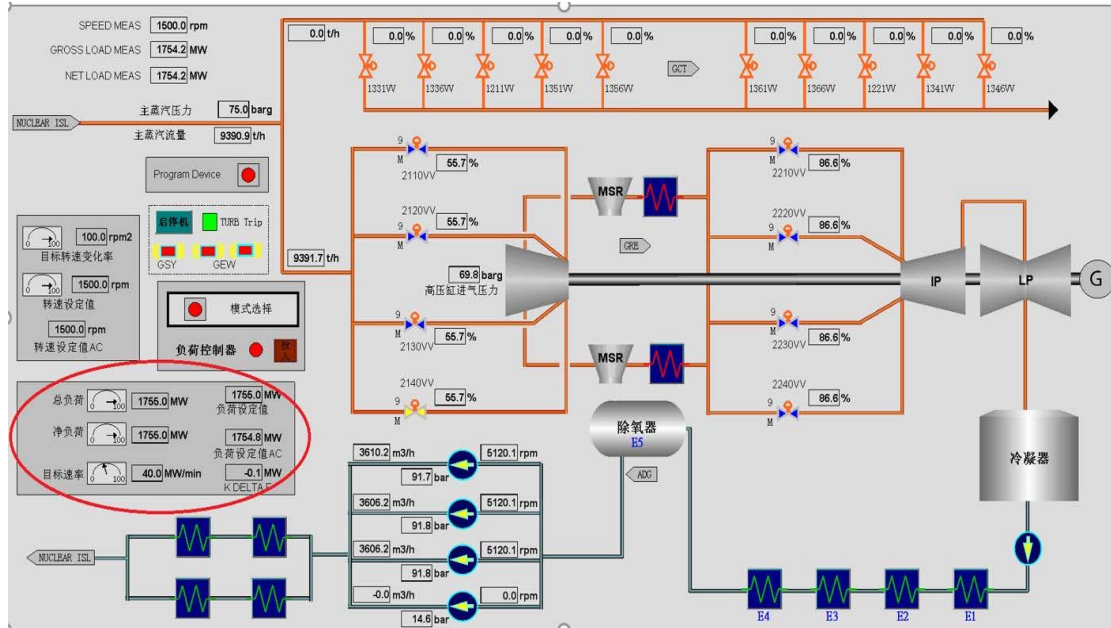
图 核电站正常满功率甩负荷至厂用电运行操作画面

步骤 3 100%Pn-25%Pn

在二回路主画面或者 GRE 负荷控制画面设定目标负荷和降负荷速率，线性降负荷到 25%。

- 设定目标负荷；
- 设定降负荷速率；
- 60%Pn 附近时手动关闭 APA1150PO 泵；

- 50%Pn 附近时手动关闭一台冷凝泵；
- 30%Pn 附近时手动关闭 APA2150PO 泵。



图二回路汽轮机操作画面

#### 步骤 4 25%Pn-汽机跳闸

继续降负荷至 88MW，核功率由 ACT 维持在 25%Pn，进行汽机跳闸与电网解列操作。

- 降负荷至 88MW；
- ADG 压力降低到 2.5bar 之后压力 VPU 控压；
- 关闭汽轮机，电网自动解列。

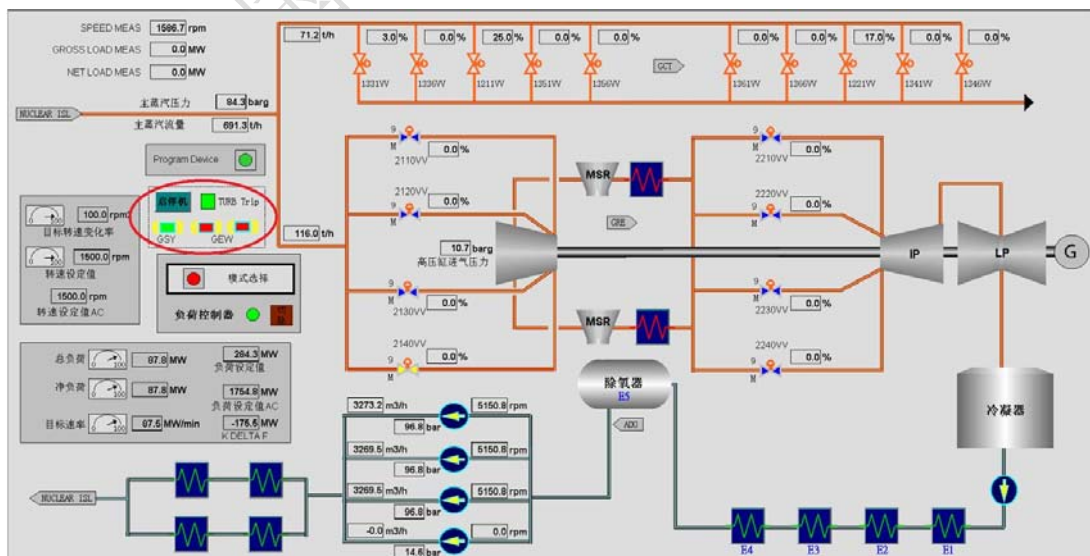


图 汽机跳闸操作页面



### 步骤 5 自动降功率至 5%Pn

核功率切换到 NF 控制，在 NF 控制页面操作，设定目标核功率到 5%Pn。

- 功率控制由 ACT 控制切换到 NF 控制；
- 设定目标功率到 5%Pn；
- 设定变化速率。

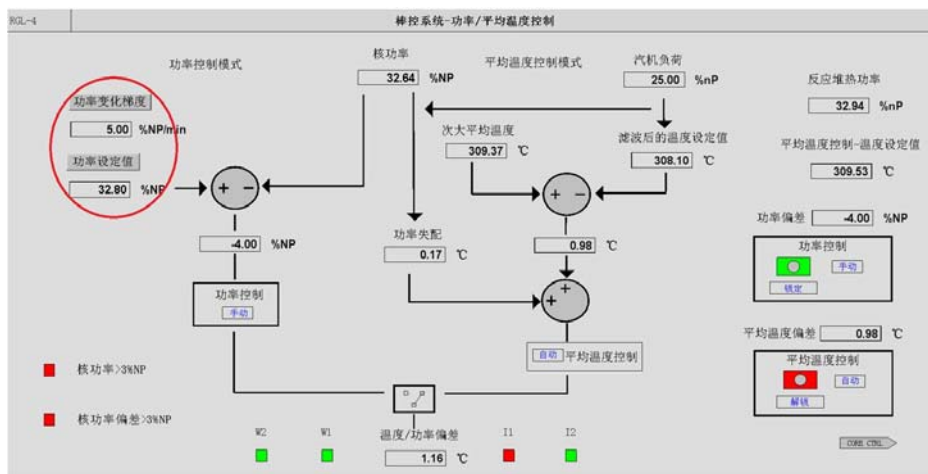


图 NF 操作页面

### 步骤 6 4%Pn SG 液位切换到 VLLCV 控制

控制核功率到 4%Pn 附近，将 SG 的液位控制切换到 VLLCV 控制。

- 功率控制由 NF 控制到 4%Pn 附近，或者手动控制下插控制棒；
- 启动 AAD 泵及泵后隔离阀，关闭 APA 泵及泵后隔离阀；
- 手动关闭 ARE 大阀和小阀，小小阀投入自动。

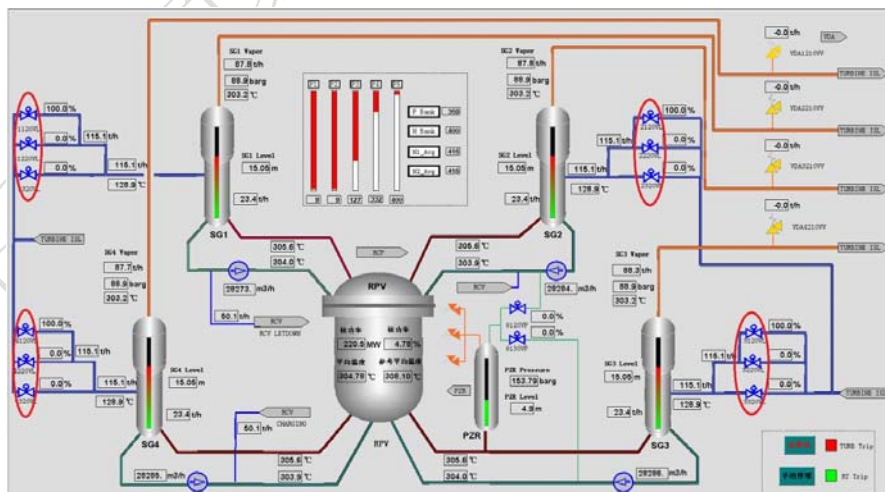


图 VLVV 阀门切换操作页面

### 步骤 7 手动降功率至热停堆

退出 NF 控制，手动控制插棒，全插 P 棒和 H 棒。

- NF 控制切换到 Manual 模式；
- 手动插棒 P 棒和 H 棒；
- 手动插棒停堆棒 N1 和 N2。

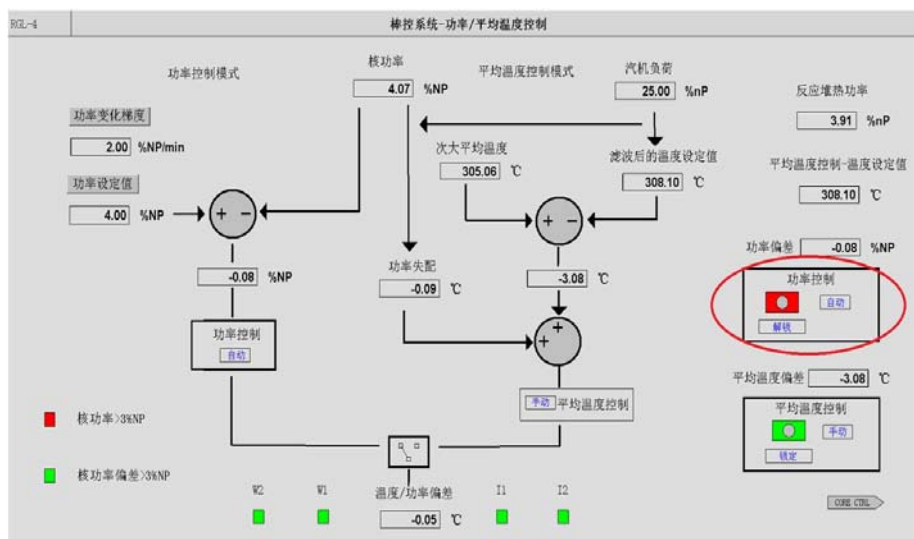


图 NF 控制 Auto 和 Manual 模式切换操作页面

步骤 8 热停提棒达临界

全提 N1/N2 停堆棒，全提 H 棒，手动缓慢提升 P 棒使得反应堆临界，ADG 由 SVA 控压切换到 VPU 控压。

- 全提 N1/N2 停堆棒；
- 所有 P、H 棒提到 9steps；
- 全提 H 棒；
- 手动缓慢提升 P 棒；注意反应性与中子通量！
- ADG 由 VPU 控压。

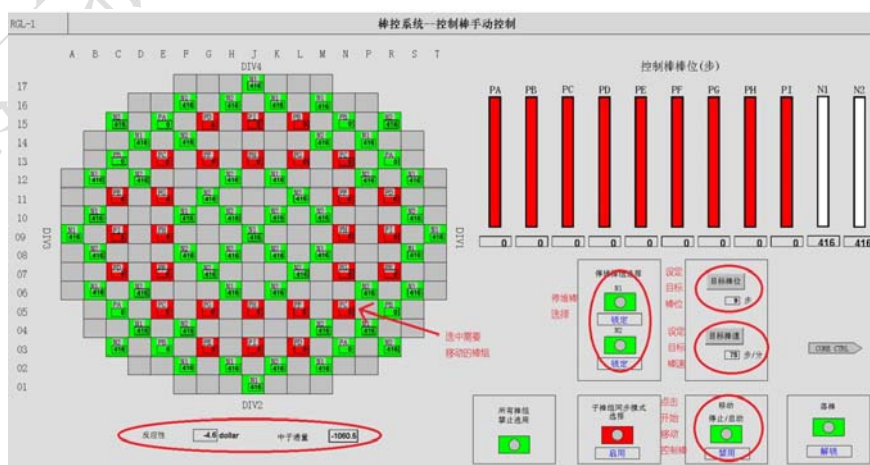


图 控制棒操作页面

步骤 9 SG 液位由 AAD 切换到 APA 控制

手动提升一回路功率，4%左右时候，给水由 AAD 切换到 APA，

- 启动 APA 泵和泵后的隔离阀，泵投入自动控制，关闭 AAD 隔离阀和泵；
- 将 ARE 大阀和小阀切为自动控制，手动关闭小小阀。

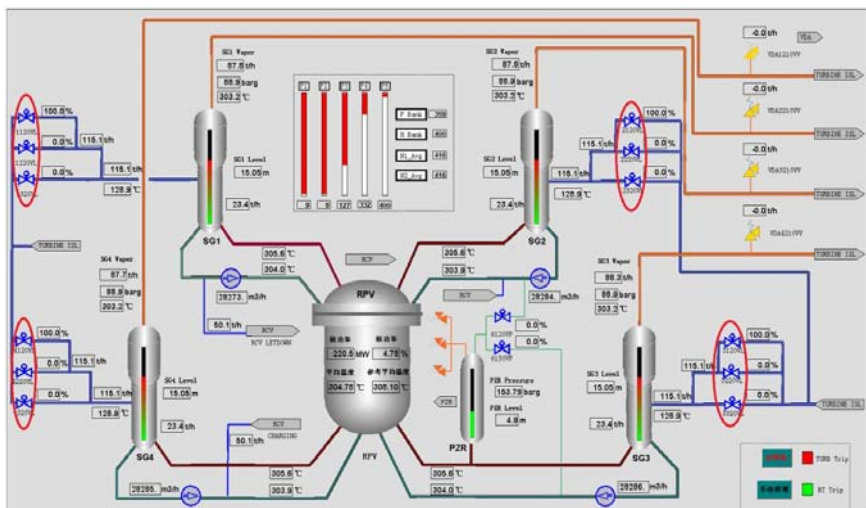


图 ARE 给水阀操作页面

步骤 10 NF 控制提升核功率到 25%Pn 切换为 ACT 控制

手动提升核功率到 10%Pn 左右，投入 NF 控制到 25%Pn，或者直接手动提升到 25%Pn，然后投入 ACT 控制。

- 25%核功率之后切换 ACT 控制；

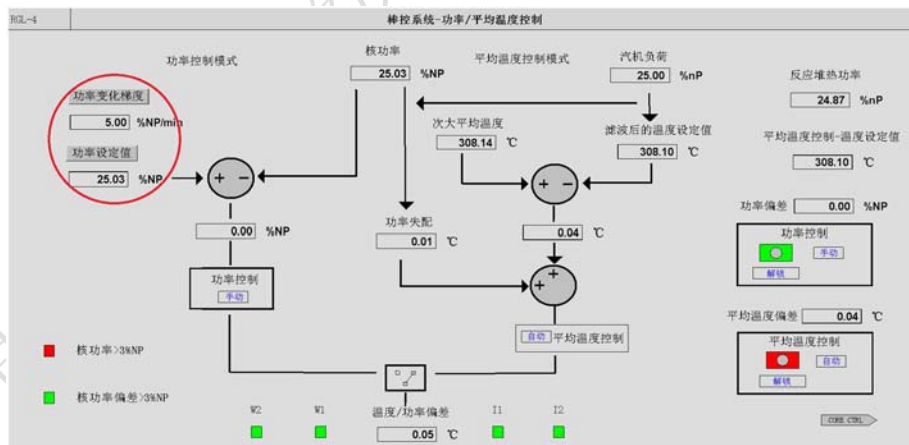


图 NF 控制页面

步骤 11 汽机冲转并网

- 启动汽轮机；
- 设置汽机转速开始冲转；
- 冲转完成后合并 GSY 开关；

- 投入 GRE1111CG (Select Mode) ;
- 投入负荷自动控制模式;
- 确认 Program Device ON 投入。

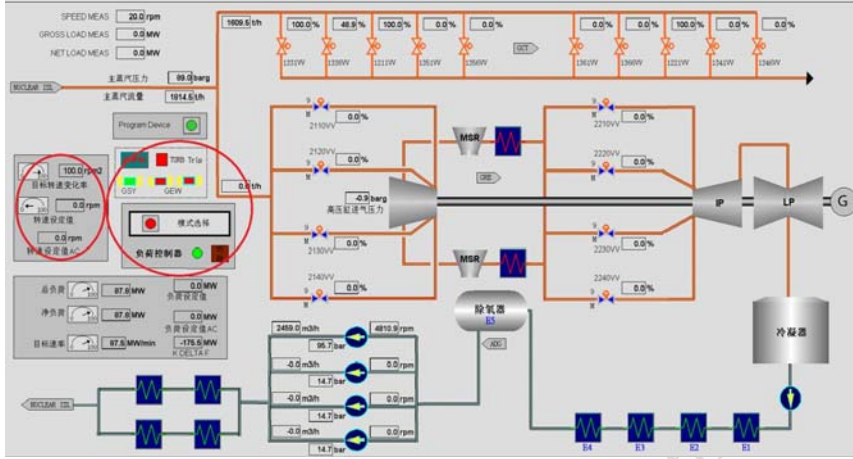


图 汽机冲转操作页面

步骤 12 堆跟机自动提到 100%Pn

设定目标负荷，设定升负荷速率（90%以后升负荷速率需要降低，防止核功率超调），汽机负荷闭环自动控制模式投入，合并 Program Device 按钮。核功率 30%的时候启动第二台 APA 给水泵，核功率 60%的时候启动第三台 APA 给水泵，核功率 50%的时候启动第二台 CEX 冷凝泵。

- 设定目标负荷，设定升负荷速率；
- 核功率 30%的时候启动第二台 APA 给水泵；
- 核功率 50%的时候启动第二台 CEX 冷凝泵；
- 核功率 60%的时候启动第三台 APA 给水泵；
- 核功率 90%的时候降低升负荷速率（2%）。

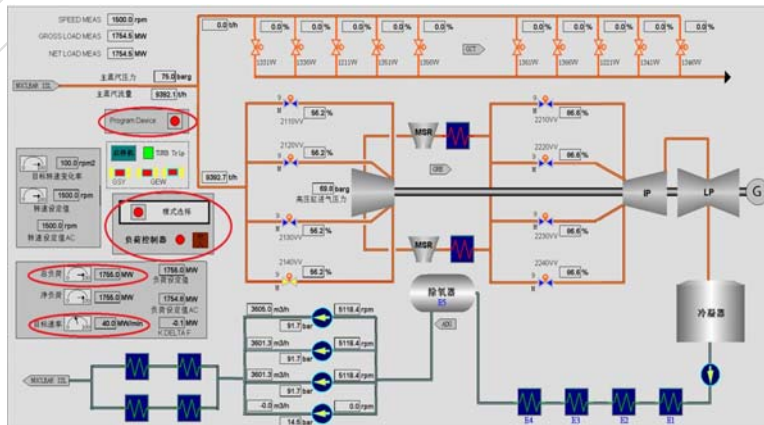


图 GRE 升负荷操作页面

### 3-7 实验结果与结论（说明在不同的实验条件和操作下可能产生的实验结果与结论）

实验报告要求包含以下内容：

- 1) 实验原理部分，通过视频学习后，需要在实验报告中简要描述核电站仿真的组成及各组成部分的功能。
- 2) 核电站稳态运行实验部分，仿真软件正常启动后可处于长期满功率稳定运行。实验结果需要包含核电站一、二回路主系统简图，并在图中标出满功率下重要系统参数的数值。
- 3) 核电站甩负荷瞬态实验部分，按操作规程进行正常操作后，核电站在所有控制系统均正常投入的情况下，最终可在孤岛状态下稳定运行。实验结果应包含如图所示的该瞬态过程中重要参数的趋势图，并重点选择反应堆功率控制系统、稳压器压力控制系统、稳压器水位控制系统、蒸发器液位控制系统、蒸汽旁路排放控制系统中的一个控制系统，结合控制逻辑进行控制系统响应的详细分析。
- 4) 核电站启停过程瞬态实验部分，包括满功率运行正常降功率至热停堆运行、热停堆运行至反应堆临界至反应堆热备用运行、反应堆热备用运行至反应堆满功率运行，按操作规程正常操纵后，反应堆都应能从一个工况顺利切换至下一工况。实验结果应包含每一阶段重要参数的趋势图，以表明每一阶段均达到了相应的工况状态。

注：如果未按操作规程进行正常操作，则可能导致核电站的参数超出正常运行范围，从而导致仿真软件超出范围无法计算的问题，仿真程序会自动停止并给出警告。如果出现上述情况，请重新启动软件，并加载相应的初始工况再次进行实验。



图 实验结果趋势图。

### 3-8 面向学生要求

(1) 专业与年级要求

核工程与核技术专业，三年级或四年级。

(2) 基本知识和能力要求

具备流体力学、传热学、工程热力学、自动控制理论等基础知识，修读过《反应堆热工水力》、《核反应堆物理》、《核电厂系统与设备》、《核电厂运行与控制》等相关课程理论知识。

### 3-9 实验应用及共享情况

(1) 本校上线时间：2018年3月8日（上传系统日志，要求与实验已开设期次数数据保持一致）

(2) 已服务过的学生人数：本校 197 人，外校 0 人

(3) 附所属课程教学计划或授课提纲并填写：

纳入教学计划的专业数：1，具体专业：核工程与和技术，

教学周期：6，学习人数：197

(4) 是否面向社会提供服务：○是 ●否

(5) 社会开放时间：年月日

(6) 已服务过的社会学习者人数：人

## 4. 实验教学特色

（该虚拟仿真实验教学课程的实验设计、教学方法、评价体系等方面的特色，限 800 字以内）

(1) 实验设计

核电站系统复杂，运行控制要求高，涉及的基础理论知识多，对知识的综合应用能力要求高。本虚仿项目利用核电站模拟机仿真平台软件开展复杂的反应堆启停堆运行控制，考虑到了多个角度的理论与实践相结合。设计一，稳态观察实验主要是与系统与设备知识相结合，重点强调基础的系统组成与运行参数。设计二，正常甩负荷瞬态实验与自动控制知识紧密结合，几乎所有重要控制系统均投入，重点考察对复杂控制系统的分析。设计三，升降功率操作实验与瞬态传热流动、堆机协调控制知识紧密结合，突出能量转

换与平衡。设计四，反应堆达临界实验与反应堆物理知识紧密结合，注重中子动力学行为。以直观、动态、感性的方式与多门专业课程理论知识结合，对于学生是一个非常好的虚拟实验方案。

### (2) 教学方法

教学主要通过网络远程上机，利用高精度核电厂工程模拟机进行虚拟实验操作，有效提高教学品质。核电厂工程模拟机一般主要用于设计验证、操作培训等工程使用，有着较为复杂的仿真模型、较高的仿真模型精度和非常逼真的仿真画面。将工程使用的模拟机经过一定改造后用于高校的核电站反应堆启停运行控制虚拟仿真实验，与实际工程现场结合非常紧密，几乎可与实际的反应堆操纵员培训媲美，非常有益核专业的学生学习相关工程知识，教学成效很好。

### (3) 评价体系

评价主要以实验报告考核为主。通过课前学习以及上机操作后，实验过程所有运行参数均有后台历史记录，可离线复盘以及用于数据后续处理。完成实验报告网上提交后，考核以实验报告中的过程参数是否满足要求作为基本指标，高阶指标重点考察对于瞬态过程的自主分析，强调根据目标自主选择分析参数、结合原理的针对性分析。

## 5. 实验教学在线支持与服务

(1) 教学指导资源：教学指导书教学视频 电子教材课程教案

(申报系统上传) 课件(演示文稿) 虚拟仿真资源其他

(2) 实验指导资源：实验指导书操作视频 知识点课件库习题库

(申报系统上传) 测试卷考试系统 其他

(3) 在线教学支持方式：热线电话实验系统即时通讯工具 论坛

支持与服务群其他

(4) 1名提供在线教学服务的团队成员；1名提供在线技术支持的技术人员；教学团队保证工作日期间提供1小时/日的在线服务

## 6. 实验教学相关网络及安全要求描述

### 6-1 网络条件要求

- (1) 说明客户端到服务器的带宽要求（需提供测试带宽服务）  
无特殊要求，客户端到服务器的带宽越高操作响应及反馈越快。
- (2) 说明能够支持的同时在线人数（需提供在线排队提示服务）

1

### 6-2 用户操作系统要求（如 Windows、Unix、IOS、Android 等）

- (1) 计算机操作系统和版本要求

支持 Windows 以及 IOS 操作系统，无版本要求

- (2) 其他计算终端操作系统和版本要求

无

- (3) 支持移动端：是 否

### 6-3 用户非操作系统软件配置要求（兼容至少 2 种及以上主流浏览器）

- (1) 非操作系统软件要求（支持 2 种及以上主流浏览器）

谷歌浏览器 IE 浏览器 360 浏览器 火狐浏览器 其他

- (2) 需要特定插件 是 否

如勾选“是”，请填写：

插件名称：（插件全称）

插件容量： M

下载链接：

- (3) 其他计算终端非操作系统软件配置要求（需说明是否可提供相关软件下载服务）

本实验需要安装“远程桌面连接”应用软件，远程登录服务器进行实验。



**6-4 用户硬件配置要求**（如主频、内存、显存、存储容量等）

(1) 计算机硬件配置要求

高于以下基本配置即可，主频 1.0GHz、内存 4G、显存 1G、存储 500G。

(2) 其他计算终端硬件配置要求

无

**6-5 用户特殊外置硬件要求**（如可穿戴设备等）

(1) 计算机特殊外置硬件要求

无

(2) 其他计算终端特殊外置硬件要求：●无○有

如勾选“有”，请填写其他计算终端特殊外置硬件要求：

**6-6 网络安全**（实验系统要求完成国家信息安全等级二级认证）

(1) 是否已完成定级备案：●是 ○否

请选择备案主体：●课程所属学校名称 ○其他

证书编号：31000059001-21015

请附信息系统安全等级保护备案证明

(2) 是否已完成等保测评：●是 ○否

请附正式测评报告中实验系统的相关描述页面（等级测评结论页、实验与平台隶属关系描述页等）

## 7. 实验教学技术架构及主要研发技术

指标	内容
系统架构图及简要说明	<p>本项目采用的仿真系统主要使用 CS 架构,用户通过 PC 客户端的远程桌面工具登陆服务器,然后使用位于服务器上的仿真平台程序进行虚拟仿真实验。位于服务器的综合仿真运行后台提供核电站主要的系统仿真,包括反应堆热工水力、堆芯物理、控制保护、设备等。仿真平台将多个子程序集成在一起完成仿真功能,如图所示;通过多任务同步控制、实时计算控制、实时数据交互技术以及历史数据存储等技术实施整个核电系统的启停功能仿真。</p> <p>仿真运行服务平台构建了整个仿真系统的存储和运行环境,还为仿真系统各种客户端程序提供接口。它按照模型工程师建立仿真模型时设定的模块交互频率和执行速率,负责控制每个仿真模块的运行和模块间的同步和期望异步,实现仿真系统的启动、冻结、</p>

停止、实时/超实时控制，此外还负责实现参数的显示和保存以及数据交互等功能。

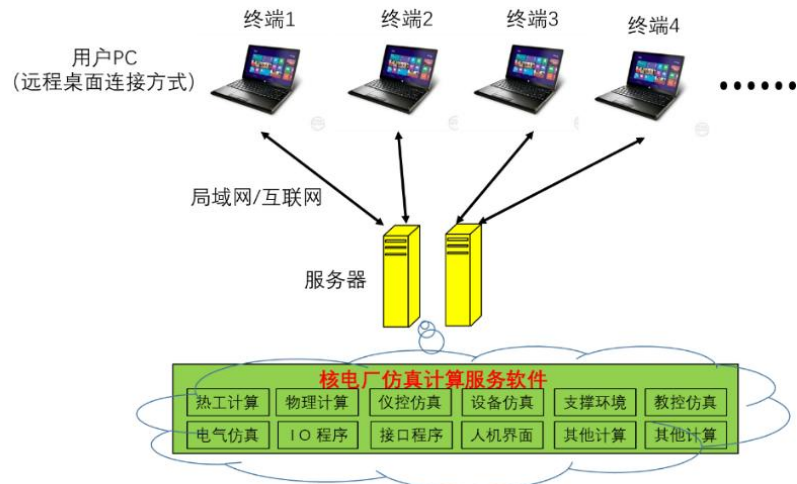


图 网络架构图

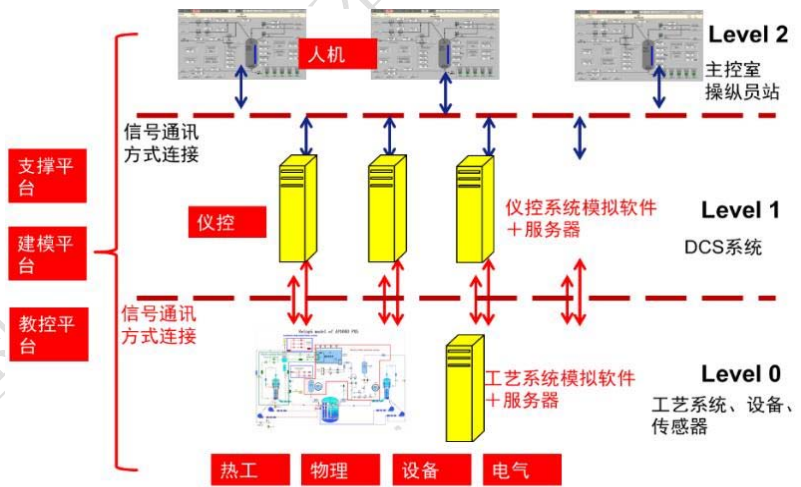


图 软件架构图

实验 教学	开发技术	<input type="checkbox"/> VR <input type="checkbox"/> AR <input type="checkbox"/> MR <input type="checkbox"/> 3D 仿真 <input checked="" type="checkbox"/> 二维动画 <input type="checkbox"/> HTML5 <input type="checkbox"/> 其他
	开发工具	<input type="checkbox"/> Unity3D <input type="checkbox"/> 3D Studio Max <input type="checkbox"/> Maya <input type="checkbox"/> ZBrush <input type="checkbox"/> SketchUp <input type="checkbox"/> AdobeFlash <input type="checkbox"/> UnrealDevelopment Kit <input type="checkbox"/> Animate CC <input type="checkbox"/> Blender <input checked="" type="checkbox"/> Visual Studio <input checked="" type="checkbox"/> 其他
	运行环境	<b>服务器</b> CPU 1 核、内存 16 GB、磁盘 500 GB、 显存 1 GB、GPU 型号 无 <b>操作系统</b> <input checked="" type="checkbox"/> Windows Server <input type="checkbox"/> Linux <input type="checkbox"/> 其他 具体版本：2016 <b>数据库</b> <input type="checkbox"/> Mysql <input type="checkbox"/> SQL Server <input type="checkbox"/> Oracle <input checked="" type="checkbox"/> 其他 <b>备注说明</b> （需要其他硬件设备或服务器数量多于 1 台时请 说明）当前服务器配置仅支持 1 个用户在线，如果需要多 用户同时在线，增加多台同类型服务器即可 <b>是否支持云渲染：</b> ○是 ●否
	实验品质 (如：单场 景模型总面 数、贴图分 辨率、每帧 渲染次数、 动作反馈时 间、显示刷 新率、分辨 率等)	单场景模型面数：10 个； 贴图分辨率：1920px * 1080px； 每帧渲染次数：1calls； 动作反馈时间： 500ms； 显示刷新率：60FPS； 分辨率：1920ppi * 1080ppi 其他：计算实时性 1：1（计算耗时：仿真物理时 间）

## 8. 实验教学课程持续建设服务计划

(本实验教学课程今后 5 年继续向高校和社会开放服务计划及预计服务人数)

### (1) 课程持续建设

日期	描述
第一年	配合国家虚仿实验课程，已将原校内教学网站迁移至公网服务器上，但还需增容扩大用户同时在线数量等改进工作。
第二年	在现有仿真软件平台基础上增加核电厂事故仿真相关内容，作为《核反应堆安全分析》等课程的实践教学部分。；
第三年	在现有二维动画基础上，引入三维虚拟现实等仿真技术和内容，增强课程的视觉效果。
第四年	简化仿真模型与操作，形成初级版仿真软件，适用于核工程相关的初级培训。
第五年	将仿真软件架构从 CS 架构变更至 BS 架构，通过浏览器即可访问和操作，增加服务器硬件资源，提高用户使用的便利性。

其他描述：

无

### (2) 面向高校、社会的教学推广应用计划

日期	推广高校数	应用人数	推广行业数	应用人数
第一年	1	30	1	50
第二年	2	60	1	50
第三年	3	90	1	50
第四年	4	120	1	50
第五年	5	150	1	50

其他描述：

无

## 9. 知识产权

软件著作权登记情况	
以下填写内容须与软件著作权登记一致	
软件名称	核电厂工程模拟机软件
是否与课程名称一致	<input type="radio"/> 是 <input checked="" type="radio"/> 否
<p>每栏只填写一个著作权人，并勾选该著作权人类型。如勾选“其他”需填写具体内容；如存在多个著作权人，可自行增加著作人填写栏进行填报。</p>	
著作权人	著作权人类型
上海交通大学	<input checked="" type="radio"/> 课程所属学校 <input type="radio"/> 企业 <input type="radio"/> 课程负责人 <input type="radio"/> 学校团队成员 <input type="radio"/> 企业人员 <input type="radio"/> 其他
权利范围	全部权力
软件著作权登记号	2013SR030166
<p>请附软件著作登记证书</p> <div style="text-align: center;"> </div>	
<p>如软件著作权正在申请过程中，尚未获得证书，请填写受理流水号。</p>	
受理流水号	

## 10. 诚信承诺

本团队承诺：申报课程的实验教学设计具有一定的原创性，课程所属学校对本实验课程内容（包括但不限于实验软件、操作系统、教学视频、教学课件、辅助参考资料、实验操作手册、实验案例、测验试题、实验报告、答疑、网页宣传图片文字等组成本实验课程的一切资源）享有著作权，保证所申报的课程或其任何一部分均不会侵犯任何第三方的合法权益。

实验教学课程负责人（签字）：

年 月 日

林萌

## 11. 附件材料清单

### 1. 课程团队成员和课程内容政治审查意见（必须提供）

（申报课程高校党委负责对本校课程团队成员以及申报课程的内容进行政审，出具政审意见并加盖党委印章；团队成员涉及多校时，各校党委分别对本校人员出具意见；非高校成员由其所在单位党组织出具意见。团队成员政审意见内容包括政治表现、是否存在违法违纪记录、师德师风、学术不端、五年内是否出现过重大教学事故等问题；课程内容审查包括价值取向是否正确，对于我国政治制度以及党的理论、路线、方针、政策等理解和表述是否准确无误，对于国家主权、领土表述及标注是否准确，等等。）

### 2. 课程内容学术性评价意见（必须提供）

[由学校学术性组织（校教指委或学术委员会等），或相关部门组织的相应学科专业领域专家（不少于 3 名）组成的学术审查小组，经一定程序评价后出具。须由学术性组织盖章或学术审查小组全部专家签字。无统一格式要求。]

### 3. 校外评价意见（可选提供）

（评价意见作为课程有关学术水平、课程质量、应用效果等某一方面的佐证性材料或补充材料，可由课程应用高校或社会应用机构等出具。评价意见须经相关单位盖章，以 1 份为宜，不得超过 2 份。无统一格式要求。）