

第二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：新能源并网的电力系统调度虚拟仿真实验

专业类代码：0806

负责人：陈中

联系电话：13815853657

申报学校：东南大学

填表日期：2021年7月10日

推荐单位：东南大学

中华人民共和国教育部制

二〇二一年六月

填报说明

1. 专业类代码指《普通高等学校本科专业目录（2020）》中的专业类代码（四位数字）。

2. 文中○为单选；□可多选。

3. 团队主要成员一般为近5年内讲授该课程教师。

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	新能源并网的电力系统调度 虚拟仿真实验	是否曾被推荐	<input type="radio"/> 是 <input checked="" type="radio"/> 否
实验所属课程 (可填多个)	电能系统基础、电力系统分析		
性质	<input type="radio"/> 独立实验课 <input checked="" type="radio"/> 课程实验		
实验对应专业	电气工程、电气工程及其自动化		
实验类型	<input type="radio"/> 基础练习型 <input type="radio"/> 综合设计型 <input checked="" type="radio"/> 研究探索型 <input type="radio"/> 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 type="checkbox"/> 不可逆操作 <input checked="" type="checkbox"/> 大型综合训练		
实验语言	<input checked="" type="radio"/> 中文 <input type="radio"/> 中文+外文字幕(语种) <input type="radio"/> 外文(语种)		
实验已开设期次	共 2 次: 1. 2019.6, 100 人 2. 2020.6, 100 人		
有效链接网址	http://xnfz.seu.edu.cn/exp/285.html		

2. 教学服务团队情况

2-1 团队主要成员(含负责人, 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	陈 中	1975.10	东南大学	副所长	研究员	13815853657	zhongchen@seu.edu.cn	项目负责、 在线教学服务
2	顾 伟	1981.05	东南大学	副院长	教授	13814005169	wgu@seu.edu.cn	项目设计、 在线教学服务
3	吴在军	1975.10	东南大学	学院书记	教授	13957129169	wuzaijun@seu.edu.cn	系统设计、 在线教学服务
4	高 山	1974.12	东南大学	副所长	副教授	13915964675	shangao@seu.edu.cn	系统开发、 在线教学服务

5	吴 熙	1985.02	东南大学	系主任	副教授	13776506982	wuxi@seu.edu.cn	课程支持、 在线教学服务
---	-----	---------	------	-----	-----	-------------	-----------------	-----------------

2-2 团队其他成员

序号	姓名	出生年月	单位	职务	职称	承担任务
1	陈歆技	1968.3	东南大学	实验室主任	副教授	模块开发、 在线教学服务
2	蒋 莉	1974.2	东南大学		讲师	模块开发、 在线教学服务
3	李海峰	1974.5	国网江苏省电力有限公司 调控中心	副总工	研究员级高工	系统设计、 系统推广
4	滕贤亮	1979.5	国网电力科学研究院	所长	研究员级高工	系统设计、 系统推广
5	庄卫金	1979.12	中国电力科学研究院	主任	研究员级高工	系统设计、 系统推广
6	蒋法成	1980.10	南京恒点信息技术 有限公司	总经理	高级工程师	系统设计、 技术支持人员
7	贾 辈	1989.3	南京恒点信息技术 有限公司	技术总监	工程师	系统开发、 技术支持人员
8	綦 芮	1995.12	南京恒点信息技术 有限公司		工程师	系统开发、 技术支持人员

团队总人数：13人 其中高校人员数量：7人 企业人员数量：6人

2-3 团队主要成员教学情况（限500字以内）

团队承担该实验教学任务情况：

姓名	课程名称	时间	备注
陈 中	电力系统分析	2016-2021	课堂教学
顾 伟	电力系统分析	2018-2021	课堂教学
陈歆技	电力系统动模实验	2016-2021	实验教学
高 山	电力系统分析	2016-2021	课堂教学
吴 熙	电力系统分析	2019-2021	课堂教学

负责人教学情况:

1、教学论文

[1] 有心知心热心-作为基层教学微管理者浅谈对“教书育人”的理解与探索, 东南大学三育人论文集, 2018。

2、实验教学项目

[1] 江苏省省级一流本科课程-虚拟仿真实验教学课程, 江苏省教育厅, 2021, 负责。

[2] 多维协同的电气类专业人才培养实践创新平台建设探索与实践, 教育部, 2020-2022, 参与。

3、所获教学奖励

[1] 东南大学三育人积极分子, 第一获奖人, 2018

[2] 电气工程学院教学优秀奖, 东南大学电气工程学院, 2017。

负责人学术研究情况

1、学术论文

[1] A promoted design for primary coil in roadway-powered system[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1-4. SCI 收录。

[2] Eigen-analysis Considering Time-delay and Data-loss of WAMS and ITS Application to WADC Design Based on Damping Torque Analysis [J]. Energies, 2018, 11(11), 3186. SCI 收录。

2、研究课题

[1] 大型交直流混联电网运行控制和保护, 2016-2021, 国家重点研发计划, 课题负责。

[2] 基于网络控制的区域互联电网动态稳定修正控制研究, 2012-2016, 国家自然科学基金面上项目, 负责。

3、学术奖励

[1] 江苏省电力科技一等奖, 江苏省电机工程学会, 第一获奖人, 2021

[2] 江苏省科学技术奖二等奖, 江苏省人民政府, 第三获奖人, 2019

注: 必要的技术支持人员可作为团队主要成员; “承担任务”中除填写任务分工内容外, 请说明属于在线教学服务人员还是技术支持人员。

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）

1. 实验的必要性及实用性

本项目开展的“新能源并网的电力系统调度虚拟仿真实验”，聚集于“新能源”和“电力系统调度”两个焦点，其必要性和实用性体现在：

（1）新能源是中国碳中和发展的关键，新能源并网及新一代电力系统调度是电气领域面临的重大技术挑战，本项目将核心技术转化为实验内容，体现了实验的挑战度和高阶性。

国家主席习近平 2021 年 4 月出席领导人气候峰会，承诺中国将力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和，这是中国基于推动构建人类命运共同体的责任担当和实现可持续发展的内在要求所做出的重大战略决策。含规模化新能源电力系统调度是国家安全经济运行的重要基石，是满足中国人民对美好生活向往的重要支撑。新能源并网及新环境下的电力系统调度是电气领域面临的重大发展机遇，也是重大技术挑战，体现了实验的“爱国情怀”和“创新精神”，以提升电气人的责任感和使命感。

（2）实验面临“调度对象难以实物化”、“调度过程难以可视化”、“调度效果难以形象化”的难题，必须通过虚拟仿真实验将现实中含巨大安全风险、强随机性新能源、强抽象操作的电力系统调度变得可重复、可分析、可探索，让学生真正理解“工匠精神”和“创新精神”。

电能是国民经济发展的重要能量来源，一旦发生事故则会造成灾难性后果。2019 年 8 月 9 日下午 5 点，因为海上风电新能源突然脱网，导致英国发生大规模停电事故，有 100 万人受到停电影响；2019 年 7 月 13 日下午 7 点，美国纽约突发大面积停电，导致核心金融 CBD 区陷入一片黑暗。

大规模电力系统，目前世界上规模最大的人工系统之一，并处于高电压大电流危险环境中，电力调度是面向大规模电力系统进行调整和控制，学生做调度实验，需要设计的实验对象满足“调度对象实物化”；在实际调度过程中，调度系统是软件平台，电力系统被抽象成一个个符号的组合，需要设计的实验过程满足“调度过程真实化”；电网安全关系到国计民生，对于调度策略的验证，无法在实际系统中做故障实验或者电网崩溃实验，需要设计的实验效果满足“调度效果

形象化”；新能源出力大小与天气因素有密切关系，在实际过程中很难模拟多种天气状况，有多种新能源带来的运行场景，需要设计的实验场景满足“实验场景可探索化”。

因此必须通过虚拟仿真实验模拟各种实验场景，以让学生真正掌握新能源并网环境下的电力系统调度知识和操作能力。新能源并网的电力系统调度实验面临“调度对象难以实物化”、“调度过程难以可视化”、“调度效果难以形象化”的难题，必须通过虚拟仿真实验将现实中有巨大人身安全、生产安全风险和新能源波动性随机性强的电力系统调度实验移植到电脑环境，将不易展现效果的复杂调度过程变得可重复、可分析、可探索，让学生真正理解“工匠精神”和“创新精神”。

(3) 学生在虚拟现实中进行调度仿真实验，加强了学生对电力系统专业课程知识的理解和应用能力，加深了学生对于未来实现“双碳目标”的深入理解，提升了学生的工程实践操作能力。

新能源并网的电力系统调度实验室，涉及电气工程专业的核心主干课程，面向《电力系统分析》，基于电路原理、自动控制原理、信号与系统、发电厂电气、继电保护、风力发电、太阳能发电等多学科知识的融合，是对大学三年知识的综合运用。学生基于真实电网数据和虚拟现实电网开展实验，面向实际调度的真实操作环境开展实际操作，从电力系统认知到常规调度到故障处置，全面提升对电力系统调度的宏观把控，全面提升学生的工程操作水平和创新能力。

2 实验设计的合理性

本项目合理性体现在：

(1) 项目提出“理论方法教学+虚拟实物仿真+工程实际操作”的实验架构，可培养学生“发现问题-分析问题-解决问题”的高阶学习能力。

实验聚焦于新能源波动、电网调度、电压调整、频率调整、故障处置等一系列核心问题，构思了“电力系统认知->正常状态电网调度->异常状态故障处置”递进式的实验环节，三个环节环环相扣，依次递进，培养了学生应用和融合所学电力系统知识，解决复杂电力调度问题的综合能力和高级思维。

(2) 项目将传统本科教学中的小电网拓展到大规模实际电力系统，给予学生自主设计、规律探究、创新实验的空间，培养了学生的创新精神。

实验将新时代下“双碳目标”涉及的新能源前沿关键元素加入了实验，给予

了学生创新实验的平台；实验过程中，将“学生自主实验策略”和“系统建议最优策略”进行互动对比和探究式分析，呈现了实验的先进性和互动性，学习结果具有探究性和个性化的特点。

（3）项目将抽象的调度实验变得可重复、可分析、可探索，设计了“操作性考核+测试性考核+尝试性考核+创新性考核”实验目标达成度多维评价方法，培养学生解决复杂问题的挑战精神。

将现实中复杂多变的多种天气状况对应的新能源发电实物化，同时将抽象复杂的电力系统调度过程进行量化“虚拟调度”；学生需要面向实际调度的真实操作环境开展实际操作，从电力系统认知到常规调度到故障处置，需要充分感知、理解、应用所学知识；并进行充分实验和规律凝练，在海量处置方案中设计出最优方案；设计了“操作性考核+测试性考核+尝试性考核+创新性考核”多维评价方法，培养学生的高阶学习能力和创新能力。

3 实验系统的先进性

本项目开展的“新能源并网的电力系统调度虚拟仿真实验”，以三维虚拟现实为基础，结合实际电网数据，开展虚拟实际操作，其先进性主要包括：

（1）项目以实际江苏电网为蓝本开展实验，体现了实验数据和实验场景的先进性。

我国电网规模居世界第一，是全球安全运行水平最高最先进的电网。为了让学生真正感知大规模电网，项目以实际江苏电网为蓝本开展实验，江苏电网是国家电网系统首个用电负荷连续三年突破 1 亿千瓦的省级电网，规模超过欧洲最大的德国电网，运行场景复杂多变，运行数据具有较强的借鉴意义。

（2）我国电力系统发展、新能源发展均处于世界领先地位，体现了实验对象和实验元素的先进性。

可再生能源是我国能源供应体系的重要组成部分，中国是世界第一大陆上风电、世界第三大海上风电国家，我国光伏累计装机量连续六年居全球首位。本项目将新时代下“双碳目标”涉及的新能源前沿关键元素加入了实验。

（3）项目基于 WebGL 版本开发应用环境，3D 可视化效果强，用户使用便捷，体现了软件开发技术的先进性。

此虚拟仿真系统采用 C#开发语言，基于 Unity 开发引擎发布的 WebGL 版本的

应用，采用主要 websocket 协议实现与服务器的通信和数据传输，3DMAX 和 Maya 实现 3D 图形可视化。系统运行平台：windows 8\windows 10，火狐浏览器、谷歌浏览器（64 位）。用户使用轻便化，无需下载安装应用，直接打开网页即可运行该虚拟仿真系统。

3-2 实验教学目标（实验后应该达到的知识、能力水平）

本项目实验内容源于工程实际和科研前沿，经过精心设计，构建出“理论方法教学+虚拟实物仿真+工程实际操作”实验架构，设计了“操作性考核+测试性考核+尝试性考核+创新性考核”实验目标达成度多维评价方法，全面提升学生理论理解、操作实践和创新能力。本项目目的是让学生通过“理论方法教学”夯实调度知识，通过“虚拟实物仿真”加强系统感知和知识理解，最终在虚拟真实环境下进行“工程实际操作”。本项目针对实验中既包含对学生操作性、测试性等常规要求，也包含尝试性、创新性的高阶要求，设计了“操作性考核+测试性考核+尝试性考核+创新性考核”多维评价方法，实现了对学生实验的知识评价、过程评价、能力评价。目标是提升操作技能和培养创新能力，并且培养学生“发现问题-分析问题-解决问题”的高阶学习能力和创新能力。

通过本虚拟仿真实验，学生可掌握以下知识：

（1）全面感知电力系统中发电厂、风电场、光伏电站、输电线路、变电站等重要设备；对新能源发电的波动性和随机性有深刻的认识，理解风电和光伏发电厂出力的影响因素；对设备参数进行计算以满足调度要求；

（2）全面掌握电力系统电网调度基础知识，以新能源全消纳为目标，从发电侧、输电侧、变电侧、用电侧全方位理解电网调度的具体应用场景；

（3）深刻理解正常状态下电网电压调整策略，以新能源出力波动为触发场景，把控无功电压耦合特性和局部调整特性，具备工程实际电压调整能力；

（4）深刻理解正常状态电网有功调度策略，以新能源出力波动为触发场景，把控有功耦合特性和全局调整特性，具备工程实际有功调度能力。

（5）深刻理解异常状态电网故障处置策略，以雷击故障为触发场景，把控故障处置的安全性和经济性的协调机制，具备工程实际故障处置能力，探究最优故障处置策略。

（6）深刻理解新能源（风力发电、光伏发电等）并网后对电力系统的影响机

理和控制措施，深刻理解我国承诺的“2030 碳达峰、2060 碳中和”的双碳目标的发展路径和关键技术难点。

3-3 实验课时

电力系统基础是电气工程及其自动化专业的一门重要技术基础课，是电气类专业必修主干课程。以电网运行分析的一般认识规律为主线，重点讲授电力系统元件建模、电力系统潮流计算、电力系统有功频率调整以及电力系统无功电压调整的理论。通过授课与讨论、实验与案例分析等重点培养学生的分析能力和解决复杂工程问题的能力，培养学生的工程实践能力。

(1) 实验所属课程课时：64 学时；

(2) 该实验所占课时：3 学时。

3-4 实验原理

1、实验原理(限 1000 字以内)

本项目**聚焦于电网调度、电压调整、频率调整、故障处置等核心问题，基于电力系统建模、调度潮流计算、新能源发电计划制定、无功电压调整机制、有功频率调整机制、故障处置机制等实验原理，设计了“电力系统认知->正常状态电网调度->异常状态故障处置”递进式的实验环节**，三个环节环环相扣，依次递进，具体实验原理和结构见图 1。

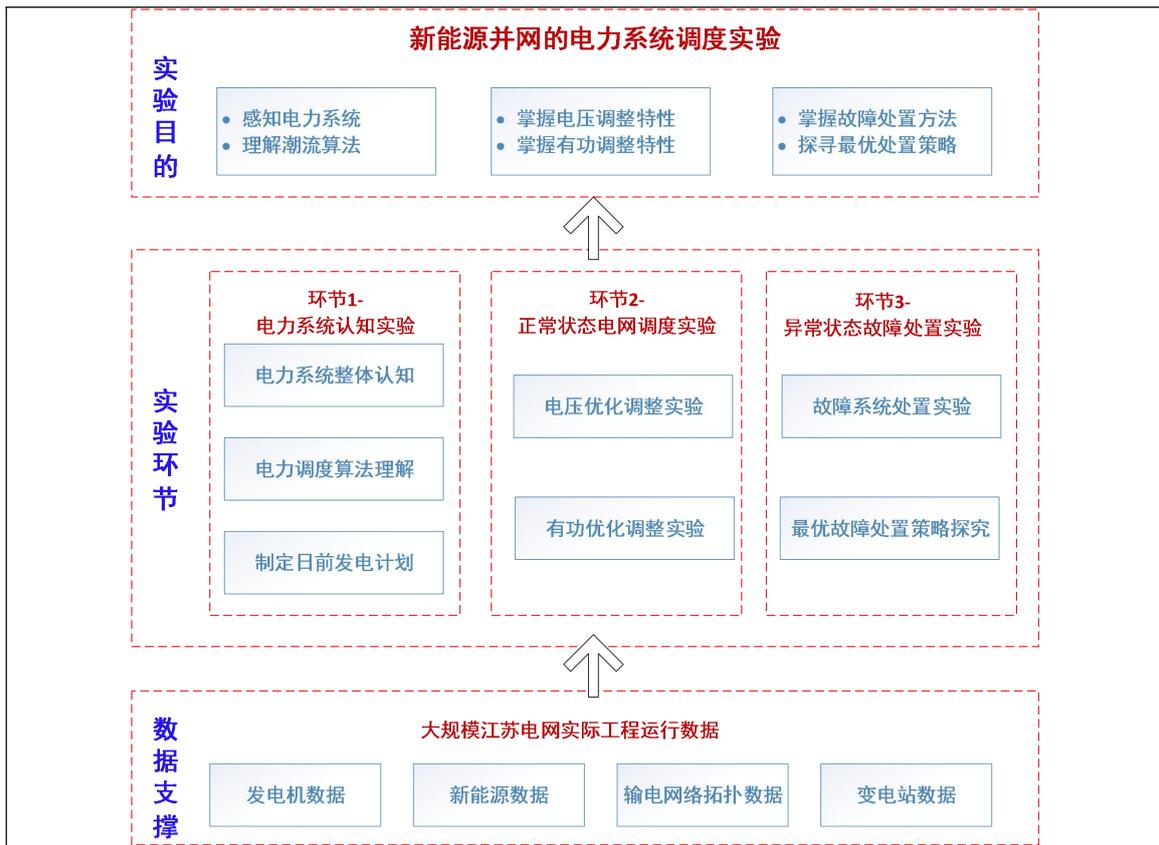


图 1 实验原理及架构

本实验包括以下具体原理知识点，学生可以通过知识角获取。

(1) 电力设备建模原理

风电出力实验原理：本实验以双馈风机为例，有功无功可以解耦，有功主要受风速近似线性影响。风电的波动性以每个时刻的数学期望值构成的日曲线表征，风电的随机性以每个时刻的方差表征。

光伏出力实验原理：本实验假定光伏以 VSC 并网，有功无功可解耦，有功主要受辐射强度、温度的近似线性影响。光伏出力的波动性以每个时刻的数学期望值构成的日曲线表征，光伏的随机性以每个时刻的方差表征。

变压器参数获取实验原理：根据空载实验得到的空载损耗和空载电压百分比计算变压器的电阻、电抗，根据短路实验得到的短路损耗和短路电流百分比计算

电纳、电导。

$$\begin{cases} R = \left(\frac{P_s}{1000} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} \right) \\ X = \left(\frac{u_s \%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} \right) \end{cases} \quad \begin{cases} G_m = \left(\frac{P_0}{U_{1N}^2} \times 10^{-3} \right) \\ B_m = \left(\frac{I_0 \%}{100} \times \frac{S_N}{U_{1N}^2} \right) \end{cases}$$

输电线路参数获取实验原理：输电线路通常会采用 π 型电路代表输电线等值

电路, 阻抗、导纳可由单位长度阻抗、导纳及线路长度计算。

$$\begin{cases} Z = R + jX = r_l l + jx_l l \\ Y = G + jB = g_l l + jb_l l \end{cases}$$

(2) 电力系统调度原理

电力系统潮流调度实验原理: 电力系统潮流本质上高维非线性代数方程组,

采用的牛顿-拉夫逊法实质上是逐步线性的方法。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & N \\ K & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ V_{D_2}^{-1} \Delta V \end{bmatrix}$$

电力系统电压无功耦合原理及局部优化调整策略: 电力系统无功功率应做到就地补偿, 调压的目的是保证各节点电压在允许的偏移范围内; 本实验采取选择变压器的变比、无功就地补偿两种方法进行调压, 局部优化策略原理为“局部调整, 就近补偿, 减低电压损耗”。

电力系统有功频率耦合原理及全局优化调整策略: 新能源和负荷的变化将引起频率的相应变化, 由调速器完成有差一次调频, 由调频器完成无差二次调频; 全局频率优化策略原理为“全局调整, 就近补偿, 减低有功损耗”。

$$\Delta P_{L0} = -(K_L + K_{GS}) \Delta f = -K_S \Delta f$$

$$\Delta f = \Delta f'' = - \frac{\Delta P_{L0} - \Delta P_{G0}}{K_G + K_L} = - \frac{\Delta P_{L0} - \Delta P_{G0}}{K_S}$$

(3) 电力系统故障处置原理

电网故障处置安全量化指标: 在电网遭遇故障或扰动时, 其控制决策往往受到安全和经济的双重制约, 故应在保证系统安全的前提下, 两者在安全控制领域的协调可有效评价处置策略。

电力系统最优故障处置策略原理: 导致线路越限的送端区域降低送出功率, 可以通过送端发电机降出力实现; 导致线路越限的受端区域降低馈入功率, 可以通过受端发电机增加出力、降低负荷实现。

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) **基于江苏电网工程真实数据的仿真蓝本:** 在整个实验环节中, 学生都是基于真实江苏电网数据 (数据均经过脱敏处理, 不涉及保密数据) 开展实验。江苏苏北地区发电资源丰富, 属于功率送出区域; 苏南地区经济发达, 负荷规模

大，属于功率馈入区域，能量具有明显的北电南送的特征，频率全局性和电压局部性特征表现明显。调度结果都可以通过实际电网进行验证，增强了学生的工程体验感。

(2) **基于真实新能源发电场站、发电厂、变电站的调度场景：**在电网调度实验中，学生调整对象都是实际的发电厂和变电站。风电选取了江苏沿海区域大规模风电场的实际统计数据，光伏选取了新能源全消纳县级区域的数据统计数据，保证了实验结果的准确性和可行性，增强了学生的场景体验感。

(3) **面向实际调度运行的真实操作环境：**在电网调度实验和故障处置实验中，操作方法、规程、流程和实际工程操作都是一致的，借鉴了实际调度 D5000 系统和 D5200 系统的基本思路，保证了学生真实操作体验感。

(4) **电网大停电过程的场景虚拟展现：**以故障处置失败为展示对象，虚拟再现了电网从负荷中心苏南区域到能源中心苏北区域的连锁崩溃过程，增强了学生对电网故障灾难的认知度，提高学生作为电气人的责任感和使命感。

3-5 实验教学过程与实验方法

本项目针对电力系统调度实验教学内容复杂且抽象的特征，提出“理论方法教学+虚拟实物仿真+工程实际操作”的实验架构，以江苏电网实际数据为蓝本，通过 VR 仿真技术建构了一个完整的电网调度环境，学生可身临其境般地沉浸在该环境中，体验和认知电网的运行与控制。整个实验分为全面感知模式、基础训练模式和综合设计模式。实验的设计是以电力系统感知为开始，学生根据掌握的知识学习和分析调度策略，对紧急故障进行正确处置，反思调度安全性和经济性的多目标要求，进而对调度策略的合理性、正确性进行验证。

在实验教学过程中，采用实验情景式、案例驱动式、问题探究式等相融合的教学方法，将各知识点分解到基础训练和综合设计模块中。结合江苏电网真实数据，通过电力系统认知、常规电网调度、故障紧急处置等三个场景的实验操作，观察和分析实验现象，使学生全面理解和掌握相关电力系统调度理论，满足“基本原理学习、综合能力提高、创新实践训练”的教学目标。在实验方法上，综合采用**观察法、控制变量法、比较法、自主设计法**等实验方法，使学生全面掌握含有新能源并网的电力系统的网络特征以及系统稳态、故障下的调度策略，理解电网中各个电气量对电网潮流分布的影响规律，如图 2 所示。

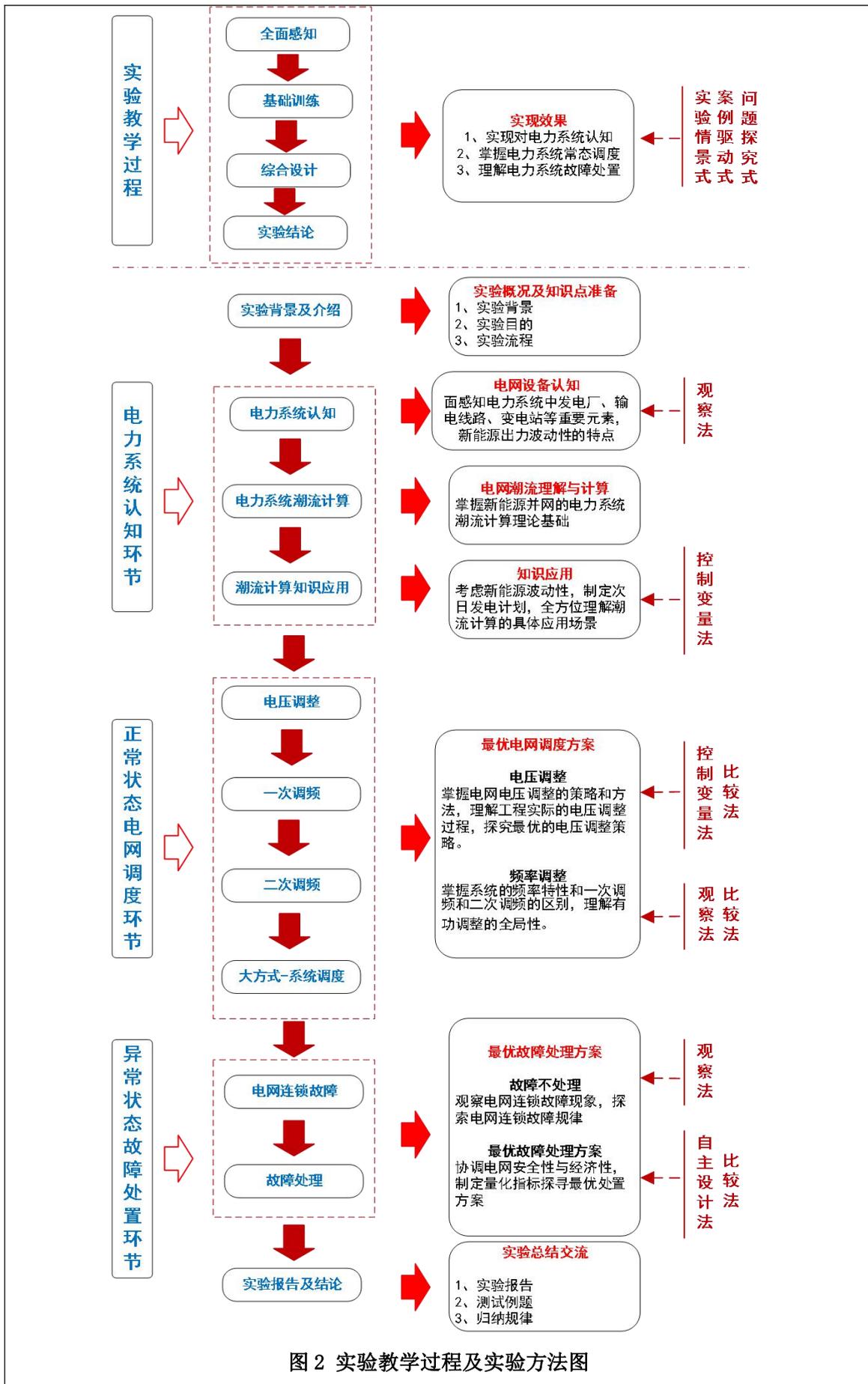


图 2 实验教学过程及实验方法图

观察法主要应用于帮助学生理解电力系统潮流分布的深刻意义，以及调度策略对于维持电网安全与稳定性的作用。锻炼学生处理复杂问题的高阶性思维、培养学生大国工匠精神和卓越工程师意识。学生可以清晰地观察系统潮流的流向和量化指标的变化，进而可以根据系统对潮流进行可视化调整。

控制变量法主要用于潮流实验知识应用实验、电网调度实验，可以让学生详细了解某个电气量对电能质量和电网性能的影响。学生应先固定系统关键参数，然后在保持发电厂出力的大小不变的情况下改变发电厂的位置，改变负荷提升的大小，直至实验结束；研究不同电气量的影响，除需要研究的电气量外，保持其他参数一致，选择不同的研究参数，从而获取系统的最优调度方案。

比较法主要用于电网调度实验和故障处理实验，将不同层次的相关知识点由易到难、系统的展示给学生。由于大规模电力系统网络拓扑复杂、非线性、多变量的特征，学生很难直接掌握相关知识，为此学生可以先从系统稳态层面一负荷小幅增长的调度方案做起，掌握相关知识后再依次进行负荷小幅增长的调度方案和故障处理的调度方案，通过比较三个实验的结果，学生可以系统的掌握大规模电力系统调度方案的相关知识点，符合学生的学习认知规律。

自主设计法主要用于故障处理实验，提高学生学习的主动性和积极性，同时有助于培养学生的创新意识。学生根据给定的线路故障，自主配置江苏电网的变电站的负荷大小，以及发电厂的出力大小，让学生深度参与故障处理调度方案的设计过程，最终得到协调系统安全性和经济性的调度方案。

3-6 步骤要求

(1) 学生交互性操作步骤，共 16 步

	步骤目标要求	步骤合理用时	目标达成度赋分模型 (多级计分)	步骤满分	成绩类型
1	熟练掌握电力系统调度大厅实际场景	2min	/	/	/
2	熟练掌握实验的背景、目的和流程	2min	/	/	/

3	熟练掌握江苏电网整体运行状态和网络拓扑	10min	<p>学生需操作进入设备认知环节（操作性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 进入发电厂环节认知学习得 1 分，未进入不得分，以下相同； ● 进入变电站环节认知学习得 1 分； ● 进入输电线路认知学习得 1 分； ● 进入风电站环节学习得 1 分； ● 进入光伏电站环节学习得 1 分； 	5	操作成绩
			<p>学生需主观尝试多种组合，以认知新能源出力规律（尝试性考核赋分）。</p> <p>在风电站环节对风速和方差进行组合，生成出力曲线：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 尝试组合≥ 3次得 4 分； ● 尝试组合 2 次得 3 分； ● 尝试 1 次得 2 分； ● 未尝试不得分。 <p>在光伏环节对辐射强度、温度和方差进行组合，生成出力曲线：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 尝试组合≥ 3次得 4 分； ● 尝试组合 2 次得 3 分； ● 尝试 1 次得 2 分； ● 未尝试不得分。 	8	操作成绩
			<p>从测试题池中随机抽出 4 道客观题，学生有不小于 5 次答题机会，每一次抽出题目均不同，以进行客观题测试（测试性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 第一次答案就完全正确，得 8 分； ● 在 n ($1 < n \leq 5$) 次答案中有完全正确答案，且整体趋势向好，得 7.5 分； ● 在 n ($1 < n \leq 5$) 次答案中有完全正确答案，但整体趋势波动，得 7.0 分； ● 在 n ($1 \leq n \leq 5$) 次答案中没有完全正确答案，但整体趋势向好，取最高的一次得分（分数≤ 7）； ● 在 n ($1 \leq n \leq 5$) 次答案中没有完全正确答案，但整体趋势波动，取次高的一次得分（分数≤ 6）。 	8	操作成绩

4	熟练掌握系统关键设备参数计算及调度潮流计算方法	10min	<p>学生点击进入“江都”变电站，进行参数计算（测试性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 第一次参数计算正确得 2 分； ● 第二次经系统公式提示计算正确得 1 分； ● 两次计算均错误，在系统提示下填写参数不得分。 <p>学生点击进入“晋陵”变电站，进行参数计算（测试性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 第一次参数计算正确得 2 分； ● 第二次经系统公式提示计算正确得 1 分； ● 两次计算均错误，在系统提示下填写参数不得分。 <p>学生点击进入“三汊湾-东善桥”输电线路，进行参数计算（测试性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 第一次参数计算正确得 2 分； ● 第二次经系统公式提示计算正确得 1 分； ● 两次计算均错误，在系统提示下填写参数不得分。 <p>学生点击进入“江都-晋陵”输电线路，进行参数计算（测试性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 第一次参数计算正确得 2 分； ● 第二次经系统公式提示计算正确得 1 分； ● 两次计算均错误，在系统提示下填写参数不得分。 <p>学生点击进入“泰州”发电厂，进行参数计算（测试性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 第一次参数计算正确得 2 分； ● 第二次经系统公式提示计算正确得 1 分； ● 两次计算均错误，在系统提示下填写参数不得分。 	10	操作成绩	
5	熟练掌握新能源出		<p>学生需主观尝试多种新能源出力方案组合，以认知新能源系统调度规律，最终学生确定个人尝试得到的风电场和光伏电站出力方案（尝试性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 尝试组合≥ 4次得 4 分； ● 尝试组合 3 次得 3 分； ● 尝试组合 2 次得 2 分； ● 尝试 1 次得 1 分； ● 未尝试得 0 分。 	4	操作成绩	

	力的随机性特点，制定对应调度方案	10min	<p>学生需操作进行调度方案制定（操作性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 进行“可行性判断”得1分，未进行不得分，以下相同； ● 进行“调度方案下发”得1分； ● 进行“方案排序”得1分； ● 进行“计划下发”得1分。 	4	操作成绩
			<p>学生通过方案尝试，认知规律并创新制定方案（创新性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 学生个人下发的最优方案和系统默认最优方案相比，如果网损指标误差$\leq 2\text{MW}$，得4分； ● 学生个人下发的最优方案和系统默认最优方案相比，如果网损指标误差$\leq 10\text{MW}$，得3分； ● 学生个人下发的最优方案和系统默认最优方案相比，如果网损指标误差$\leq 20\text{MW}$，得2分； ● 学生个人下发的最优方案和系统默认最优方案相比，如果网损指标误差$> 20\text{MW}$，得1分。 	4	操作成绩
6	完成电力系统认知测试题，巩固知识点，加深对电力系统的认知	10min	<p>系统给出6道测试题，学生有不小于5次答题机会，以进行客观题测试（测试性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 第一次答案就完全正确，得6分； ● 在n（$1 < n \leq 5$）次答案中有完全正确答案，且整体趋势向好，得5.5分； ● 在n（$1 < n \leq 5$）次答案中有完全正确答案，但整体趋势波动，得5.0分； ● 在n（$1 \leq n \leq 5$）次答案中没有完全正确答案，且整体趋势向好，取最高的一次得分（分数≤ 5）； <p>在n（$1 \leq n \leq 5$）次答案中没有完全正确答案，且整体趋势波动，取次高的一次得分（分数≤ 4）。</p>	6	操作成绩
7	熟练掌握电压调整的局部性特点和调压调整的规律	5min	<p>学生需主观尝试多种调压方案组合，以认知调压规律，最终学生确定个人尝试得到的调压方案（尝试性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 尝试组合≥ 5次得5分； ● 尝试组合4次得4分； ● 尝试组合3次得3分； ● 尝试组合2次得2分； ● 尝试组合1次得1分； <p>不尝试得0分。</p>	5	操作成绩

			<p>学生需操作进行调度方案制定（操作性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 进行“运行状态参看”得1分，未进行不得分，以下相同； ● 进行“方案排序”得1分； ● 进行“方案执行”得1分； 	3	操作成绩
8	熟练掌握一次调频的原理	5min	<p>学生点击进入计算，一次调频后系统频率及系统实际增加的出力（测试性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 第一次参数计算正确得4分； ● 第二次经系统公式提示后，计算正确得2分； ● 两次计算均错误，在系统提示下填写参数不得分。 	4	操作成绩
9	熟练掌握二次调频的原理及调频电厂的选择依据	10min	<p>学生需操作二次调频，进行调度方案制定（操作性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 进行“运行状态参看”得1分，未进行不得分，以下相同； ● 进行“遥控预置”得1分； ● 进行“遥控执行”得1分； ● 进行“方案排序”得1分。 	4	操作成绩
			<p>学生需主观尝试多种二次调频方案组合，以认知调频规律，最终学生确定个人尝试得到的调频方案（尝试性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 尝试组合≥ 5次得5分； ● 尝试组合4次得4分； ● 尝试组合3次得3分； ● 尝试组合2次得2分； ● 尝试组合1次得1分； ● 不尝试得0分。 	5	操作成绩
10	完成电网调度运行测试题，测试学生对知识点的掌握程度	10min	<p>系统给出8道测试题，学生有不小于5次答题机会，以进行客观题测试（测试性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 第一次答案就完全正确，得8分； ● 在n（$1 < n \leq 5$）次答案中有完全正确答案，且整体趋势向好，得7.5分； ● 在n（$1 < n \leq 5$）次答案中有完全正确答案，但整体趋势波动，得7.0分； ● 在n（$1 \leq n \leq 5$）次答案中没有完全正确答案，且整体趋势向好，取最高的一次得分（分数≤ 7）； ● 在n（$1 \leq n \leq 5$）次答案中没有完全正确答案，且整体趋势波动，取次高的一次得分（分数≤ 6）。 	8	操作成绩

11	深入体会电力系统故障后不及时处置的严重后果	2min	/	/	/
12	熟练掌握电力系统故障后的故障处置策略	10min	<p>学生面对故障后线路越限，需主观尝试多种故障处置方案组合，以认知故障处置规律，最终学生确定个人尝试得到的处置方案（尝试性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 尝试组合≥ 5次得5分； ● 尝试组合4次得4分； ● 尝试组合3次得3分； ● 尝试组合2次得2分； ● 尝试组合1次得1分； <p>未尝试得0分。</p>	5	操作成绩
13	深入理解调度中心提前制定的故障处置策略	2min	<p>学生通过方案尝试，需要参考系统给出默认最优方案，并创新制定新方案（创新性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 学生查看并分析系统提供默认故障策略表得2分，未查看不得分； <p>学生借鉴并再次修改个人处置方案，和系统默认最优方案相比：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 如果“安全经济性综合评估指标”误差$\leq 10\%$，得8分； ● 如果“安全经济性综合评估指标”误差$\leq 20\%$，得7分； ● 如果“安全经济性综合评估指标”误差$\leq 30\%$，得6分； ● 如果“安全经济性综合评估指标”误差$\leq 40\%$，得5分。 	10	操作成绩
14	熟练掌握电力系统故障处置过程，加深对电力系统调度知识的运用	2min	<p>学生需制定故障处置方案，并执行故障方案（操作性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 进行“运行状态参看”得1分，未进行不得分，以下相同； ● 进行“方案排序”得1分； ● 进行“执行最优方案”得1分。 	3	操作成绩
15	完成电力系统故障处置测试题	10min	<p>系统给出4道测试题，学生有不小于3次答题机会，以进行客观题测试（测试性考核赋分）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 第一次答案就完全正确，得4分； ● 在n（$1 < n \leq 3$）次答案中有完全正确答案， 	4	操作成绩

			且整体趋势向好，得 3.5 分； ● 在 n ($1 < n \leq 3$) 次答案中有完全正确答案，但整体趋势波动，得 3.0 分； ● 在 n ($1 \leq n \leq 3$) 次答案中没有完全正确答案，且整体趋势向好，取最高的一次得分（分数 ≤ 3)； 在 n ($1 \leq n \leq 3$) 次答案中没有完全正确答案，且整体趋势波动，取次高的一次得分（分数 ≤ 2)。		
16	梳理实验流程，分析实验结果完成实验报告	2min	系统要求必须提交实验报告。	/	/

(2) 交互性步骤详细说明

操作共分 3 个阶段（整体认知->调度实验操作及分析->实验报告及归纳），共 16 个步骤。

阶段一、整体认知

本阶段包括步骤 1-步骤 2，其主要目的：让学生熟悉江苏电网网络结构，回顾相关专业基础知识，了解实验的背景和目的，为进行电力系统潮流实验与电网调度实验做好准备。

步骤 1：调度大厅整体宏观认知。

操作目的：让学生熟悉电力系统调度大厅的实际场景已经电力系统的实际调度过程。

操作过程：学生首先会进入虚拟调度大厅，浏览真实的调度场景。调度大厅内部主要包含大屏、工位、虚拟电脑。大屏上上方展示系统的全局统计信息，并且将根据实时电网调度结果动态变化。其中：调度发电是 风电场、火电厂、光伏电站的有功出力和电压幅值；调度用电是所有变电站节点的有功负荷和无功负荷；而实验调度操作将会通过虚拟电脑完成，模拟真实的调度过程。

操作结果：学生掌握调度大厅的布局以及电网调度操作过程。



(a) 调度大厅示意图



(b) 调度大厅大屏信息展示

图 4 调度大厅场景

步骤 2: 实验目的及实验流程。

操作目的：使学生掌握实验的目的并了解实验的操作流程。

操作过程：正式开始实验后，学生依次进入新能源并网的电力系统调度虚拟仿真的实验背景、实验目的和实验流程三个环节。该模块旨在回顾《电力系统稳态分析》、《电力系统暂态分析》等专业课程的知识点，了解本虚拟仿真实验项目的背景、目的以及总体流程。

操作结果：学生掌握该实验的目的及意义，了解电力系统调度在维持系统正常运行安全运行方面的重要性，同时掌握实验流程的具体步骤，顺利完成该实验。

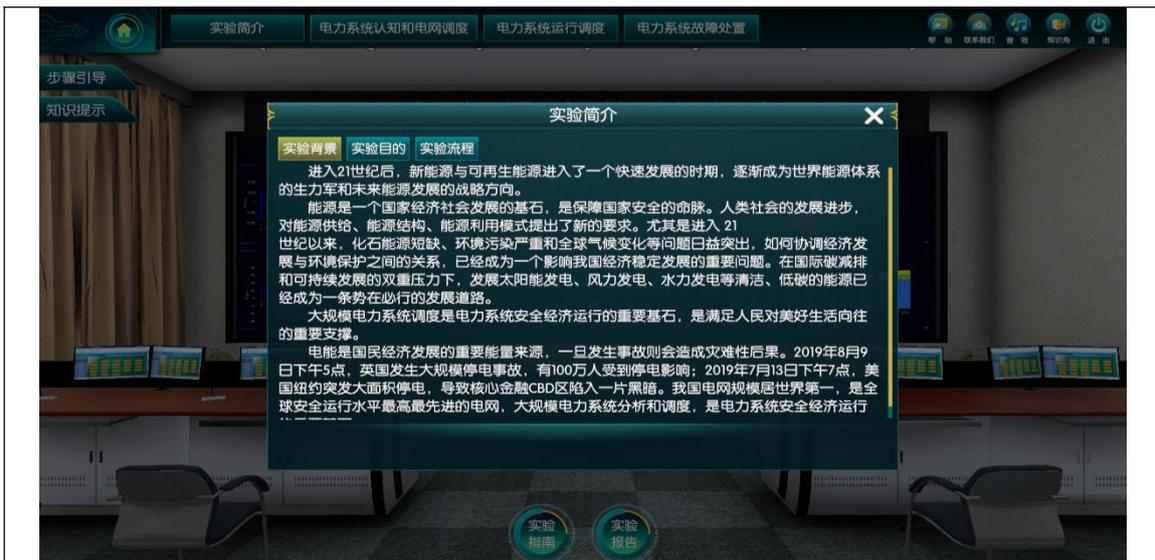


图 5 实验目的和知识准备

阶段二、调度实验操作及分析

本阶段包括三个实验模块，通过“(A) 电力系统认知模块→(B) 正常状态电网调度模块→(C) 异常状态故障处置”三个递进式模块的实验操作，开展系列探究与电网调度仿真实验，掌握影响电网潮流分布的关键性因素及其规律；了解发电厂和负荷在复杂电力系统调度中的工程应用价值；理解发电厂出力、负荷大小以及系统网损之间的耦合机理；掌握新能源发电计划的制定方法；明白电压调整的局部性以及有功调整的全局性；熟悉电网连锁故障的起因与危害；感受调度策略对于提升电网安全性与经济性的深刻意义。

(A) 电力系统认知模块。遵循数学建模原理，提取电网中复杂的物理模型的关键量，用数学表达式表征各个电气设备，以适用于复杂电力系统潮流实验。学生在公式引导下，将关键电气设备出厂的铭牌参数转化为调度分析和计算的可用参数。

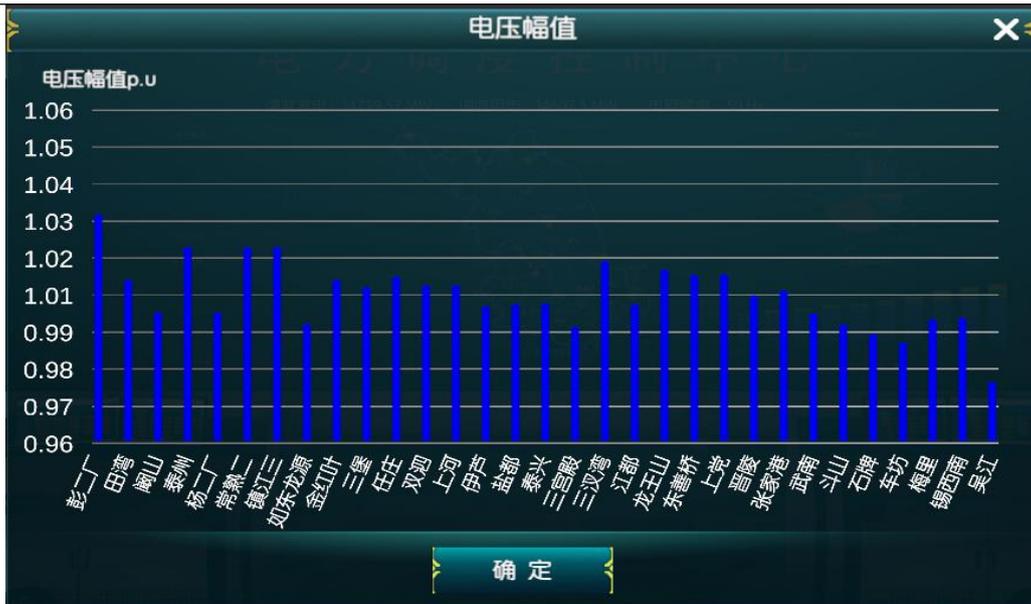
步骤 3：电力系统认知。

(a) 江苏电网整体认知

操作目的：使学生掌握江苏电网的整体运行状态和网络拓扑。

操作过程：学生点击“电力系统认知”，调度大厅中大屏上的各个模块闪烁，学生可以依次点击闪烁的模块进入子场景认知设备结构及运行原理。

操作结果：学生可以全局性掌握江苏电网的运行状态和网络拓扑，包括系统发电量与用电量以及装机容量。



(a) 系统节点电压幅值认知



(b) 系统发电和用电量认知



(c) 江苏电网各个地市用电量认知



(d) 江苏电网装机容量认知



(e) 江苏电网主要网络拓扑认知

图6 江苏电网整体认知

(b) 电力系统一次设备及新能源出力规律认知

操作目的：使学生掌握电力系统中各个一次设备的外部结构以及内部结构，同时通过动画向学生展现电力系统设备的运行状态及原理。

操作过程：在电力系统认知网络拓扑子界面，分别点击沙盘上闪烁的“火电厂”、“风电场”、“光伏电站”、“变电站”和“线路”，可以观察电气设备的相应实际模型，子界面会出现相应标签说明其组成部分。在不同设备子界面中可以点击显示其设备参数。该模块旨在让学生从直观上认知电力系统的各个重要组成

单元的实际模型。

其中，在风电场和光伏电站中，会计及天气状况的随机性，展现出新能源出力的特性曲线，并为后续实验做基础。

操作结果：学生掌握一次设备的实际模型以及新能源出力的规律。



(a) 发电厂子界面



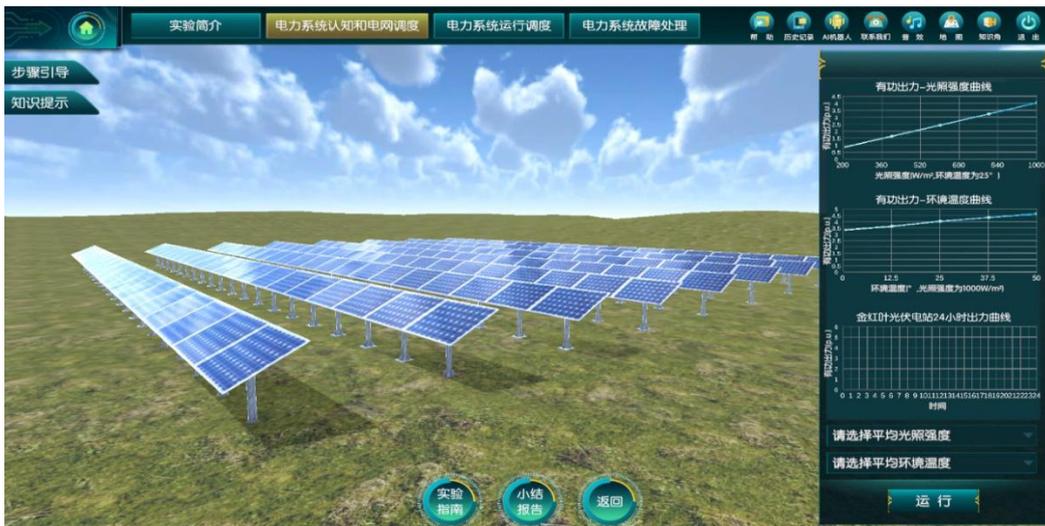
(b) 变电站子界面



(c) 线路子界面



(d) 风电场子界面



(e) 光伏电站子界面

图 7 电网设备认知

(c) 电力系统设备及新能源出力规律认知测试

操作目的：使学生巩固电力系统认知环节中的内容。

操作过程：认知环节结束后，系统会从测试题池中随机抽出 4 道客观题供学生作答，学生有不小于 5 次答题机会，每一次抽出题目均不同，以进行客观题测试，系统会根据多次作答的情况判定分数。

操作结果：学生深入了解电力系统调度大厅的全貌，掌握电力系统各设备及新能源出力的规律。

具体测试赋分见“学生交互性操作步骤”中的赋分规则。

步骤 4：电力系统电网调度计算方法。

操作目的：使学生掌握系统关键设备参数的计算过程及大规模电力系统潮流计算方法

操作过程：学生点击“电力系统电网调度”，学生需依次点击沙盘上“变电站”、“发电厂”和“线路”，进入电气设备子界面查看相应的出厂铭牌参数，并根据公式转化为调度分析和实验的可用参数。点击“知识点”显示与潮流实验相关的节点导纳矩阵的知识和潮流实验方法。该模块旨在让学生从数学模型上认知电力系统的“源网荷”模型，并掌握潮流实验的具体方法和应用场景。

操作结果：学生掌握关键参数的计算方法，并可以根据电网调度结果总结系统运行规律



(a) 变电站参数计算



(b) 线路参数计算



(c) 节点导纳矩阵元素计算



(d) 电网调度结果

图8 电力系统参数计算机初始电网调度结果

(B) 正常状态电网调度模块。学生通过正常运行下的多场景调度实验获取度规律。考虑电力系统非线性、多变量、强耦合的复杂特征；新能源出力具有随机性强，对电网的冲击性大，控制与调度方案多样，故建立不同层面的量化指标，通过多场景的重复性实验比较不同调度方案的优劣。面对新能源出力的随机性，能够制定合理的发电计划，维持电网的稳定运行；针对电网不同的运行方式，分别以电压偏移量最小及网损损耗最小目标，制定最优的运行方式。

步骤 5：电网调度知识应用

操作目的：使学生掌握新能源出力的随机性特点，并根据新能源出力的特点制定相应的运行方式。

操作过程：

① 学生点击“电网调度应用”按钮，切换场景并弹出界面如下：



图9 预测曲线

共展示 3 种曲线，分别为光伏曲线、风力曲线、负荷曲线，用户点击按钮，展示相应曲线，此处的曲线有系统认知环节随机生成，并不固定。

② 用户点击“确定次日新能源发电功率”按钮，退出该界面，进入确定次日新能源发电功率界面如下：

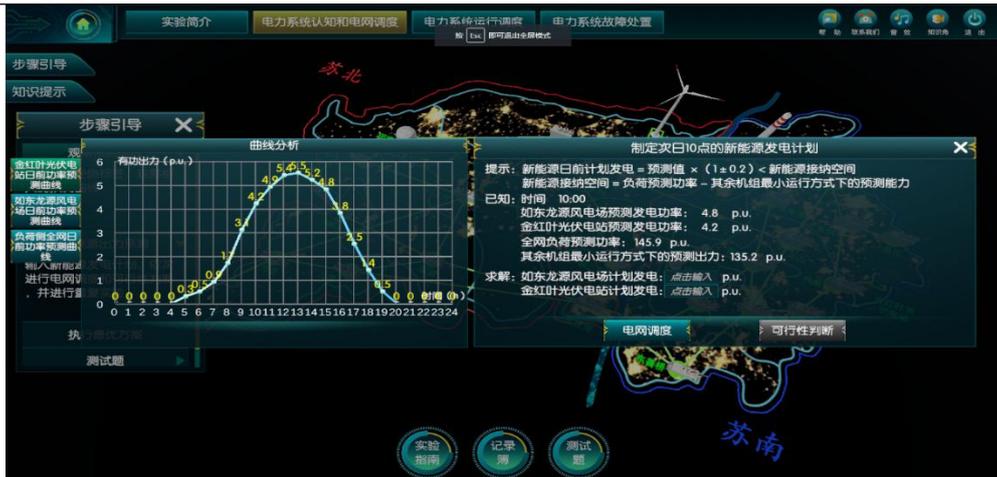


图 10 制定发电计划操作界面

③ 当用户将数值输入正确时，“可行性判断”按钮，进入可选中状态为绿色。

④ 用户点击“可行性判断”按钮，若代码里潮流实验程序提示越限或者迭代不收敛，则弹出文字提示——潮流越限，请重新填写，并清空输入框，回到初始状态；若未超限，则“电网调度”按钮进入可选中状态；

⑤ 用户点击“电网调度”按钮，调度动画播放完毕后弹出提示框“电网调度已完成”；

⑥ 学生点击“计划下发”按钮，弹出文字提示——日前发电计划制定完成，已下发如东龙源风电场、金红叶光伏电站及各个发电厂，并切换场景至调度大厅，调度大厅的大屏上展现最新的电网调度结果。

操作结果：学生归纳并掌握新能源出力的特点，并能够正确制定相应的电网运行方式。

步骤 6: 完成 电力系统认知和电网调度 的测试题

操作目的：使学生巩固知识点，并测试学生对知识点的掌握程度。

操作过程：点击页面下方的测试题，依次完成所有的测试题并提交。共 5 次答题机会，若学生未全部回答正确，可重新作答。系统会根据多次作答的情况判定分数。

操作结果：学生进一步加深对电力系统的认知，熟练掌握相关知识点。具体测试赋分见“学生交互性操作步骤”中的赋分规则。



图 11 电力系统认知和电网调度测试题

步骤 7: 电力系统调度—电压调整

操作目的: 使学生掌握电压调整的局部性特点和调压调整的规律。

操作过程:

① 用户点击“电压调整”按钮, 弹出警告界面如下;



图 12 提示信息

② 用户点击“确定”按钮, 退出该界面, 并切换场景和播放动画如下所示;

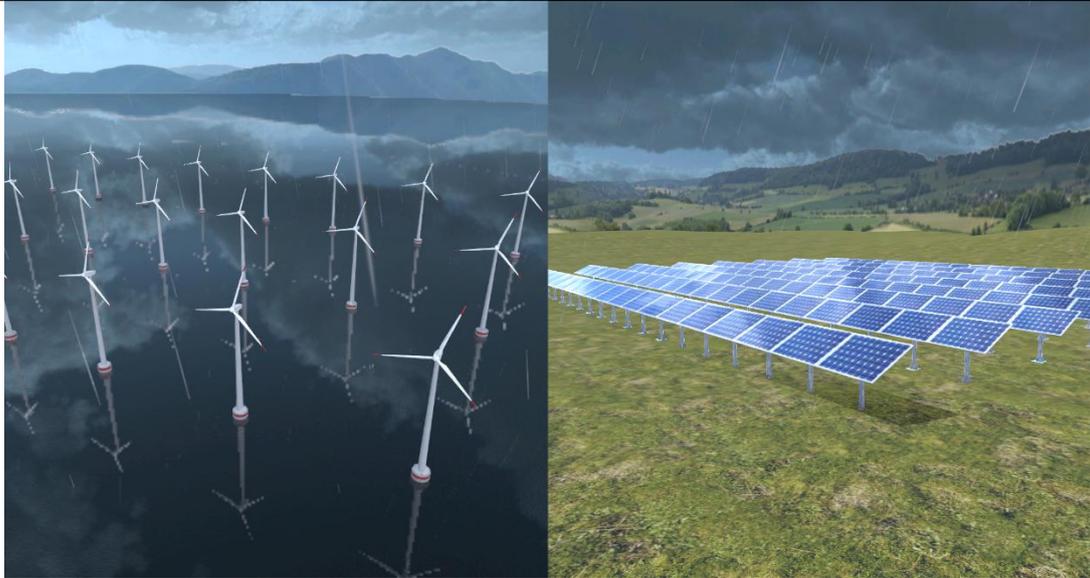


图 13 新能源出力变化动画

界面左侧展示光伏电站场景，界面右侧展示风力发电场景；界面左侧播放动画 1（动画 1：光伏电站上空出现阴云天气，太阳能电池板上亮度调暗一点），界面右侧播放动画 2（动画 2：阴云密布，台风袭来，风力发电机的风叶转速越来越慢，直至停下）。2 个动画同步播放，共持续时间 5s 左右；动画播放完毕，切换场景至调度大厅。

- ③ 调度大厅中的虚拟电脑闪烁提示，用户点击“虚拟电脑”，切换场景至网络拓扑沙盘，此时网络拓扑上“吴江”和“车坊”变电站闪烁，并出现文字提示——电压过低，请进行电压调整。（持续 3s，半透明效果）
- ④ 用户点击“吴江”或“车坊”变电站，并弹出界面如下所示。



图 14 电压调整操作界面

初始默认遥控预置和遥控执行按钮为置灰状态，不可点击；分接头变比和无功补偿量为不可选择状态。用户点击“遥控取消”按钮，退出遥控操作界面，返回网络拓扑图场景，用户再次点击“吴江变电站”弹出遥控操作界面后，界面内容回复至初始状态。

若用户确认遥信名选择除“吴江”或“车坊”外其他选择，弹出文字提示——遥信名错误，当用户确认遥信名选择“吴江”或“车坊”后，遥控预置、分接头变比和无功补偿量解除置灰状态，学生可以选择常见的典型值。

⑤ 用户点击“遥控预置”按钮，弹出等待界面如下



(a) 遥控预置动画



(b) 遥控预置成功信息提示

图 15 遥控操作等待界面

初始为(a)等待界面，待加载条由 0 开始加载至完成（3s 完成），出现(b)界面；用户点击“确定”按钮，退出该界面；之后预置、确认遥信名、分接头变比和无功补偿量进入不可选择状态，遥控执行解除置灰状态

⑥ 用户点击“遥控执行”按钮，退出遥控操作界面，并播放动画，学生学习变压器分接头动作过程和无功补偿装置的动作过程。动画播放完毕后，学生可以选择再次观看学习或者进行下一步实验。

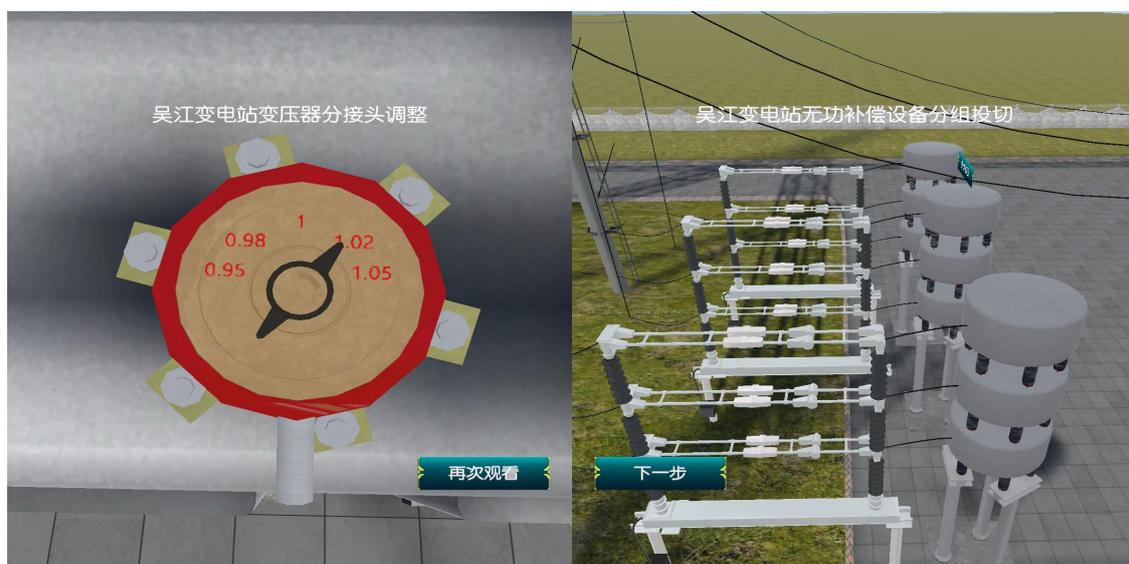


图 16 电压调整实验动画

⑦ 若学生选择进行下一步实验，切换场景至调度大厅，展现系统最新的运行方式。

⑧ 该实验可以重复操作，用户通过选择不同的变压器分接头和无功补偿量，进行重复性实验，根据重复性实验结果探索最优的无功补偿方式。

⑨ 用户每行一次实验，均会记录实验结果，实验结果记录如下图所示：



图 17 实验数据记录簿

⑩ 点击记录簿中的查看按钮，可以查看电力系统详细的运行状态。



图 18 电压调整后系统运行参数

⑪ 如果学生不再进行电压调整实验，则会进入最优电压调整实验方案选择，学生需要根据实验结果选择最优的电压调整实验。



图 19 最优实验方案选择

⑫ 执行完最优电压调整方案后，实验界面返回至主界面，报警信息消息，并弹出提示信息：系统恢复至正常运行状态。



图 20 系统恢复至正常运行状态提示信息

操作结果：学生掌握电压调整的规律，能够自主制定相应的电压调整策略。具体测试赋分见“学生交互性操作步骤”中的赋分规则。

步骤 8 电力系统调度——一次调频

操作目的：使学生掌握一次调频的原理。

操作过程：

① 用户点击“频率调整”按钮，切换场景，并弹出界面如下的测试题：



图 21 提示信息

② 用户点击确定按钮，大厅中大屏上的频率数值变化并且闪烁提示，弹出如下界面：



图 22 警告信息

③ 用户点击“确定”按钮，判断用户输入的频率是否正确。若用户输入错误，弹出文字提示——正确答案为 49.9Hz；若用户输入正确，则退出该界面，并播放动画，学生可以通过动画直观地学习一次调频的原理及各个设备的动作次序。动画播放完成后，学生可以选择再次观看或者进行下一步实验；

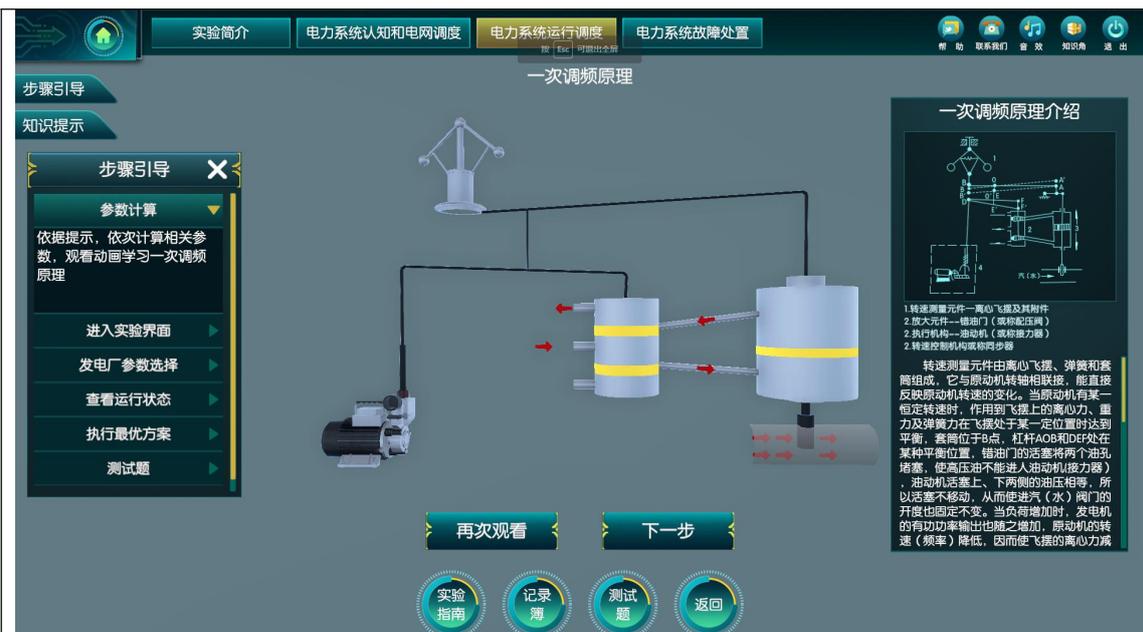


图 23 一次调频原理介绍界面

④ 若学生选择进行下一步实验，此时，调度大厅大屏上左右两侧的柱状图展现新的统计信息结果和系统频率，系统频率更改为 49.9Hz。

操作结果：学生掌握一次调频的原理以及相关设备的动作次序。

步骤 9 电力系统调度—二次调频

操作目的：使学生掌握二次调频的原理以及调频电厂的选择依据。

操作过程：

① 一次调频结束后，播放警报音效，并弹出界面如下所示的测试题：



图 24 警告信息

② 用户点击“确定”按钮，判断用户输入的出力值是否正确，若用户输入错误，弹出文字提示——正确答案为 700MW；若用户输入正确，则退出该界面，进行下一步实验；

③ 弹出提示：为使系统频率恢复至 50Hz，请选择电厂进行二次调频

④ 网络拓扑上的 彭二厂 常熟二 镇江三 阌山 泰州 杨二厂 六个发电厂闪烁，学生点击任意一个后，弹出下图界面



图 25 二次调频操作界面

图中电厂名称：用户第④步在网络拓扑上点击的电厂名称。

初始默认遥控预置和遥控执行按钮为置灰状态，不可点击；初始默认有功调整量和操作状态为不可选择状态；用户点击“遥控取消”按钮，遥控操作界面内容恢复至初始状态；

⑤ 用户“确认遥信名”选择后，并判断选择的遥信名是否与电厂名称一致，若一致，遥控预置、有功调整量和操作状态解除置灰状态，若不一致，则提示“遥信名错误”；



图 26 遥信名选择错误后的提示

⑥ 用户点击“遥控预置”按钮，判断用户是否输入正确，若错误，弹出文字提示——参数调节错误，请重新调节，若再次错误将会直接提示正确参数；若正确，则弹出等待界面如下：



图 27 遥控预置等待界面

初始为左侧等待界面，待加载条由 0 开始加载至完成（3s 完成），出现右侧界面；用户点击“确定”按钮，退出该界面；此时遥控预置、确认遥信名、有功调整量和操作状态进入不可选择状态，遥控执行解除置灰状态；

⑦ 用户点击“遥控执行”按钮，退出遥控操作界面，并播放动画学生可以通过动画直观地学习二次调频的原理及各个设备的动作次序。动画播放完成后，学

生可以选择再次观看或者进行下一步实验；



图 28 二次调频原理介绍动画

⑧ 动画播放完毕切换场景（场景：调度大厅大屏上部系统频率更改为“系统频率：50Hz”）。

⑨ 二次调频实验可以重复性实验，并且每次试验后均会记录实验结果。



图 29 频率调整实验记录簿

⑩ 点击记录簿中的查看按钮，可以查看电力系统详细的运行状态。



图 30 电压调整后系统运行参数

⑪ 如果学生不再进行频率调整实验，则会进入最优频率调整实验方案选择，学生需要根据实验结果选择最优的电压调整实验。



图 31 最优实验方案选择

⑫ 执行完最优频率调整方案后，实验界面返回至主界面，报警信息消失，并弹出提示信息：系统恢复至正常运行状态。



图 32 系统恢复至正常运行状态提示信息

操作结果：学生掌握二次调频的规律，能够自主制定相应的频率调整策略。具体测试赋分、尝试赋分、创新赋分见“学生交互性操作步骤”中的赋分规则。

步骤 10：完成电网运行调度测试题

操作目的：使学生巩固知识点，并测试学生对知识点的掌握程度。

操作过程：

① 根据电压调整实验和频率调整实验的实验结果，对比分析出两者之间的相同点及差别。

② 点击页面下方的测试题，依次完成所有的测试题并提交。共 5 次答题机会，若学生未全部回答正确，可重新作答。系统会根据多次作答的情况判定分数。



图 33 测试题

操作结果：学生进一步加深对电力系统的认知，熟练掌握相关知识点。具体测试赋分见“学生交互性操作步骤”中的赋分规则。

(C) 异常状态故障处置模块。设计了在故障状态下的电网调度实验，在系统故障场景展开高级应用，以进一步验证所归纳准则的有效性。学生依据实验已经获得的调度规律和准则，可以很好地应对系统断线等紧急故障场景，同时协调故障处置的安全性和经济性，彰显电网调度策略的价值与意义，也提高了学生的创新能力。

步骤 11：故障不处置。

操作目的：使学生掌握电力系统在发生故障后，如不及时处置带来的严重后果。

操作过程：点击“故障不处置”，系统提示：江都-晋陵过江线遭受雷击发生跳闸事故。观察电网连锁故障展示，学习在电力系统发生故障后，如不及时处置带来的严重后果；

操作展示：

① 子场景中江都-晋陵过江线上出现闪电标志，紧接着在变电站子场景中展示变压器的断路器跳闸动画；



图 34 过江线路遭受雷击动画



图 35 变电站内断路器跳闸动画

② 江苏省 13 个地级市按照常州、无锡、苏州、镇江、南通、南京、扬州、泰州、盐城、淮安、宿迁、连云港、徐州的顺序依次变黑，市周围的线路也随之变黑，同时在右下角展现故障发展过程中的报警信息。直至电网最后达到全黑状态，表示全省停电。



(a) 连锁故障过渡过程



(b) 连锁故障最终状态

图 36 江苏电网连锁故障展示

操作结果：学生掌握了故障后不及时处置带来电网大停电的严重危害。

步骤 12：电力系统故障处置。

操作目的：使学生掌握在电力系统发生故障之后故障处置的流程。

操作过程：

①子场景中江都-晋陵过江线上出现闪电标志，紧接着江都-晋陵过江线在沙盘上由绿色变为黑色；

② 在变电站子场景中展示变压器跳闸动画；

③ 武南—斗山，泰兴—斗山，三汊湾—东善桥，上党—晋陵这四条线路出现过载，线路上方存在标签，点击标签将会提示线路过载信息；



图 37 线路过载信息展示

④ 网络沙盘上，3 个发电厂（常熟二 阚山 杨二厂）和 3 个变电站节点（东善桥 晋陵 武南）均闪烁；

⑤ 用户为了协调电网的安全性与经济性，用综合指标来量化不同的调度策略，点击“知识点”，出现相关指标的计算公式。用户可以点击任何一个闪烁的节点，点击以后弹出遥控操作的界面如下进行电网调度操作：



图 38 操作界面

⑥ 用户可以重复性地选择多个设备进行参数的调节,并形成一种故障处置方案。然后进行电网调度,判断电网运行的安全性,并记录实验数据。

⑦ 如果用户设计的调度方案不能保证系统的正常安全运行,无法使系统恢复至正常安全运行状态,则会弹出提示,使用户继续进行探索故障处置的电网调度方案,并探索其中的规律。



图 39 继续进行实验的提示信息

⑧ 用户还可以多次进行实验,形成多个故障处置方案。并记录每一种运行方式的实验数据,数据记录如下图所示,通过记录可以查看每一次实验的调度方案以及对应的系统运行状态。



图 40 数据记录表格

⑨ 当用户生成若干种故障处置方案后,点击“方案排序”按钮,故障处置方

案将会按照“切机量”由小到大的顺序排列。

步骤 13: 查看故障处置策略表

操作目的：使学生了解对于特定的故障，调度中心均会提前制定相应的最优控制策略。

操作流程：

① 用户自主制定处置方案，很难寻找到最优处置方案，因此给出不同故障所对应的最优处置方案。

② 用户点击“策略表”，将会弹出给出不同故障所对应的最优处置方案界面，用户需要根据实验中的故障，选择正确的初值方案。



图 41 策略表

③ 用户根据策略表的处置方案，再次更改系统的运行方式，操作过程同上一个步骤。

④ 运行方式更改完毕后，进行电网调度，并且保留新的实验数据。

⑤ 用户再次点击“方案排序”和“指标对比”，将会出现新的排序，并且最优的初值方案对应的综合指标将会最低。指标为安全经济性综合评估指标。

操作结果：学生掌握查看策略表的方法，并了解调度中心均会提前制定相应的最优控制策略。

步骤 14: 发送最优故障处理方案。

操作目的：使学生掌握电力系统实际故障处置过程，进一步加深对电力系统调度知识的应用。

操作过程：

① 在“不同指标对比”图出现后，学生需要选择最优的运行方案，同时页面下方出现“执行最优方案”按钮；



图 42 最优故障处置方案选择界面

② 点击“执行最优方案”按钮后，江苏省调度中心将调度指令发送至相应的变电站和发电厂中。



图 43 调度中心发送最优调整方案

③ 在相对应的各个变电站和发电厂接收到调度大厅的调度指令，调整至目标值后，江苏电网进入故障处理的实践环节。



(a) 雷击故障



(b) 开关断开



(c) 最优方案实施效果

图 44 最优故障处理方案实践过程

而若不处置该故障所引发的电网连锁故障如下图所示。



图 45 不处置故障所引发的电网大停电

通过对比可知，实施最优故障处置方案，不仅可以让电网重新恢复稳定运行状态，避免发生大停电事故，还可以在量化指标的指导下，让电网运行达到安全性与经济性的平衡。

操作结果：学生掌握故障处置的实际过程，进一步掌握电力系统调度的相关知识。具体尝试赋分、创新赋分见“学生交互性操作步骤”中的赋分规则。

步骤 15：完成 电力系统故障处置 测试题。

操作目的：使学生巩固知识点，并测试学生对知识点的掌握程度。

操作过程：点击页面下方的测试题，依次完成所有的测试题并提交。共 5 次答题机会，若学生未全部回答正确，可重新作答。系统会根据多次作答的情况判定分数。具体测试赋分见“学生交互性操作步骤”中的赋分规则。



图 46 测试题

操作结果：学生进一步加深对电力系统的认知，熟练掌握相关知识点。

阶段三、实验报告及归纳

步骤 16：完成整个实验，并提升思考。

实验完成后，根据新能源并网的电力系统调度虚拟仿真实验的实验现象和数据分析结果，应有所思考，并提交相应的实验报告。

电力系统认知和电网调度		
序号	内容	得分
1	发电厂认知	0
2	变电站认知	0
3	输电线路认知	0
4	生成风电厂出力曲线	0
5	生成光伏电站出力曲线	0
6	江都变电站变压器参数计算	0
7	晋陵变电站变压器参数计算	0
8	三汊湾-东善桥线路参数计算	0
9	江都-晋陵线路参数计算	0
10	泰州发电厂参数计算	0
11	进行电网调度	0

图 47 系统认知和电网调度实验报告

电力系统运行调度		
序号	内容	得分
1	调压实验遥信名选择正确与否	0
2	是否进行电压调整实验	0
3	是否重复进行电压调整实验	0
4	电压调整实验中点击查看运行状态	0
5	调压实验时候进行方案排序及选择最优方案	0
6	一次调频调频后的系统频率是否填写正确	0
7	一次调频后的系统实际增加的出力时候填写正确	0
8	调频实验遥信名选择正确与否	0
9	是否进行二次调频实验	0
10	是否重复进行频率调整实验	0

提交

图 48 电力系统运行调度实验报告

电力系统故障处理		
序号	内容	得分
1	进行变电站参数调节	0
2	进行发电厂参数调节	0
3	是否进行电网调度	0
4	查看故障处置策略表	0
5	根据策略表进行电网调度	0
6	是否进行重复试验	0
7	查看记录簿	0
8	查看调度策略	0
9	查看运行状态	0
10	完成测试题	0

提交

图 49 电力系统故障处置实验报告

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）

本虚拟仿真项目在不同的实验环节中，不同实验条件和学生的不同操作行为均可产生不同的实验结果与结论。具体如下：

环节一：系统认知和电网调度环节：

序号	实验内容	实验结果	结论
1	系统认知和电网调度	（1）可再生能源认知： <u>风电场风力等级和风力分布概率；光伏电站光照强度和</u> <u>环境温度；</u>	从视觉、听觉、触觉层面帮助学生全面从系统设备参数、可再生能源

		<p>(2) 发电厂参数：<u>自导纳、互导纳</u></p> <p>(3) 输电线路参数：<u>电阻、电抗</u></p> <p>(4) 日前最优发电计划：<u>风电场、光伏电站发电计划制定、日前发电计划是否合理，最优日前发电计划是否正确</u></p>	<p>处理以及电网日前发电计划制定等方面认识电力系统和电网调度</p>
2	正常态电网调度	<p>(1) 电压调整：<u>电压调整措施是否合理；最优电压方案是否正确</u></p> <p>(2) 一次调频方案：<u>调频后系统频率，系统功率增加量；</u></p> <p>(3) 二次调频方案：<u>遥信电站选择是否正确，调节参数是否正确</u></p>	<p>从视觉、听觉、触觉层面帮助学生充分了解电网电压调整、一次调频以及二次调频的核心知识</p>
3	异常状态电网故障处置	<p>(1) 故障不处置后果：<u>认知程度考核</u></p> <p>(2) 故障最优处置方案：<u>各变电站参数设定；最优故障处置方案制定</u></p>	<p>从视觉、听觉、触觉层面帮助学生全面认识电力系统连锁故障的后果，以及故障有效合理处置所带来的效益</p>

实验总结——本环节考核要求学生在完成实验后对于系统认知和电网调度、运行调度、故障处置三个环节分别进行总结，并形成实验报告，要求记录每一步的操作及结果以及评价，并撰写实验总结、规律分析和实验感想。主要考核学生对不同实验条件和不同操作行为所产生不同的实验结果与结论的认知，帮助学生真正掌握电力系统调度三个环节的相关知识，通过最终的实验记录和感想进一步提高学生对于上述知识的掌握程度。

3-8 面向学生要求

(1) 专业与年级要求

本实验项目面向高等学校电气工程及自动化相关专业的学生。相关实验步骤可拓展至发电厂电气继电保护等方向课程的学习。

项目对应的核心知识点与《电能系统基础》课程直接关联，也适用于《电力系统暂态分析》、《发电厂电气原理》、《电力系统自动装置原理》、《电机学》等课程的相关知识、能力要求的培养。

通常安排在本科 2-3 年级学习。对于专业人员，可在掌握相关知识后进行实验。

(2) 基本知识和能力要求

本实验项目要求学生的先修课程包括《电路》、《自动控制原理》、《电力系统继电保护》和《电力系统自动装置原理》及其他基础课程，学生需要具备电力系统的相关基础理论知识并有一定的电气实验操作基础。具体包括：

- 学生需掌握电力系统发电机、变压器、线路的稳态模型；
- 学生需掌握牛顿拉夫逊法的极坐标潮流模型和算法；
- 学生需掌握电力系统电压调整策略，包括发电机调压、变电站分接头调压、无功补偿调压等知识；
- 学生需掌握电力系统调频知识，包括发电机增减出力、变电站切负荷等知识；
- 学生需具备线路输送极限功率、故障电流工程计算、电力系统暂态稳定等基础知识；
- 学生对电力系统优化运行有一定的综合分析和优化能力。

(3) 实验全过程要求

实验基于“理论方法教学+虚拟实物仿真+工程实际操作”的实验架构开展实验，要求学生在充分预习相关理论的前提下进行实验，具体可参考《教学指导书》、《课件》以及“知识点课件库”。

实验聚焦于新能源波动、电网调度、电压调整、频率调整、故障处置等一系列核心问题，构思了“电力系统认知->正常状态电网调度->异常状态故障处置”递进式的实验环节，三个环节环环相扣，依次递进，要求学生按照逻辑过程进行实验，做到不跳步骤、不省步骤，具体可参考《实验指导书》以及“知识点课件库”。

实验将抽象的调度实验变得可重复、可分析、可探索，设计了“操作性考核+测试性考核+尝试性考核+创新性考核”实验目标达成度多维评价方法，要求学生具有一定的探索精神，遇到关键问题，可以通过“论坛”-“在线讨论”功能，和实验人员以及老师共同交流。

3-9 实验应用及共享情况

(1) 本校上线时间：2019年9月1日（上传系统日志）

(2) 已服务过的学生人数：本校200人，外校1000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：电力系统基础，

教学周期：16，学习人数：100

(4) 是否面向社会提供服务：●是 ○否

(5) 社会开放时间：2019年9月1日

(6) 已服务过的社会学习者人数：500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）**实验方案设计思路特色：**针对大规模电力系统调度难以实物化的特点，基于江苏电网工程实际，将传统教学小电网实验教学拓展到大规模实际新能源电力系统虚拟仿真实验，并设计了“电力系统认知→正常状态电网调度→异常状态故障处置”递进式实验环节，体现了实验的探究性与挑战度。实验避免了物理实验所产生的设备和人身危险性，可重复虚拟再现各种新能源运行场景与故障现象；学生从知识认知到获取规律到规律应用，目的是全面促进学生对电力系统调度的知识获取、实际操作和规律探索。并通过调度效果增强电气人的责任感和使命感，体现了“实验思政”与“课程思政”的融合。

（2）**实验教学方法创新：**针对电力系统调度实验内容复杂且抽象的特征，在实验教学过程中，提出“理论方法教学+虚拟实物仿真+工程实际操作”实验方法，基于真实运行数据，具有高仿真度，实现在虚拟环境中做真实验，实验结果可以植入真实工程系统运行。学生通过“理论方法教学”夯实调度知识，通过“虚拟实物仿真”加强系统感知和知识理解，在虚拟真实环境下进行“工程实际操作”提升操作技能和培养创新能力。项目采用实验情景式、案例驱动式、规律延拓式、问题探究式等相融合的教学方法，通过“认知与观察”、“控制与比较”、“设计与探究”的综合实验方法，开展虚拟仿真实验，满足电力行业及社会对高素质人才的要求。

（3）**学生实验目的达成度评价方法创新：**针对实验中既包含对学生操作性、测试性等常规要求，也包含尝试性、创新性的高阶要求，设计了“操作性考核+测试性考核+尝试性考核+创新性考核”多维评价方法，实现了对学生实验的知识评价、过程评价、能力评价。实验设计了操作步骤逻辑客观考核、测试题库客观考核、实验知识迭代主观考核、知识创新主观考核等多维评价方法；并针对不同知识储备、不同学习能力、不同学习态度的多类型学生，通过实验迭代次数、准确性趋势、创新优化趋势等环节，体现了过程性考核和学习能力考核。

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) 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) 5 名提供在线教学服务的团队成员; 4 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 8 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)

带宽要求: 20M 下行对等带宽。

经测试客户机, 带宽在 20M 以上时, 能够有较快的加载速度和较好的交互体验。

本次测试基于主流配置计算机, 模拟学生在校内校外不同的使用环境, 最大限度地还原用户上网学习虚拟仿真实验的需求。

测试一: 物理连接链路测试。测试目的: 测试客户机和虚拟仿真实验项目网站的延迟和丢包情况; 测试方法: 客户机对本次虚拟仿真实验项目网站进行 PING 操作。

测试二: 网络质量测试。测试目的: 测试不同网络环境访问本虚拟仿真实验页面的加载情况。测试方法: 通过 IP 代理, 测试客户机在不同地域环境下打开虚拟仿真实验项目网页的速度。

测试结果:

当客户机带宽小于 20M 时, 丢包情况严重、网络延时都很高, 部分环境延时可以达到 20ms 以上, 丢包率超过 5%;

当客户机带宽小于 20M 的时候, 在不同 IP 对本虚拟仿真实验网页打开的测试中, 网页打开速度较慢, 特别是课件加载卡顿现象也常有发生, 访问效果不理想。

基于以上测试结果, 我们推荐客户机的带宽应大于 20M。

(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)

本虚拟仿真项目的服务器最佳响应并发数为 300。

我们模拟用户访问虚拟仿真项目网站首页、用户登录和加载课件等操作。

经测试, 当用户数量在 300 以下时, 各项服务均能在 0.2s 内做出响应, 服务器负载处于较低水平, 课件加载也很快。当用户数达到 2000, 服务响应时间维持在 0.8s 以内, 但课件加载速度下降严重。当用户数达到 6000 时, 服务响应时间超过 1s, 服务器负载也超过了 80%。

基于以上测试结果我们认为本虚拟仿真项目服务器的最佳响应并发数为 300。

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

计算机操作系统为 Windows7、Windows8、Windows10

Deepin15.7 (国产 Linux 系统)

(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

(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)

学生需要在 Windows7、Windows8、Windows10 系统环境下, 使用以下浏览器

打开：

浏览器类型	支持 WebGL	不支持 WebGL
Mozilla Firefox 52 及以上版本	支持	
Google Chrome 57 及以上版本	支持	
Apple Safari 11 及以上版本	支持	
MS Edge 16 及以上版本	支持	
360 浏览器	基于（Chrome）内核，并且开启极速模式、智能开启硬件加速情况下支持。存在右键划线问题，属于浏览器自身设置原因，关闭浏览器鼠标手势即可	基于（IE）内核，不支持

浏览器:Google Chrome

下载地址：http://dl.hdmoon.com/tools/chrome_x64.exe

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

Web 端 用户硬件要求

处理器：Intel（R）Core（TM）i5

主频：2.4GHz

内存：8GB

显卡：NVIDIA GeForce GTX GT740 2G

（2）其他计算终端硬件配置要求

无特殊要求，满足能上网功能即可。

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 ○有

(2) 其他计算终端特殊外置硬件要求：●无 ○有

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) 证书编号：

32011543007-21003

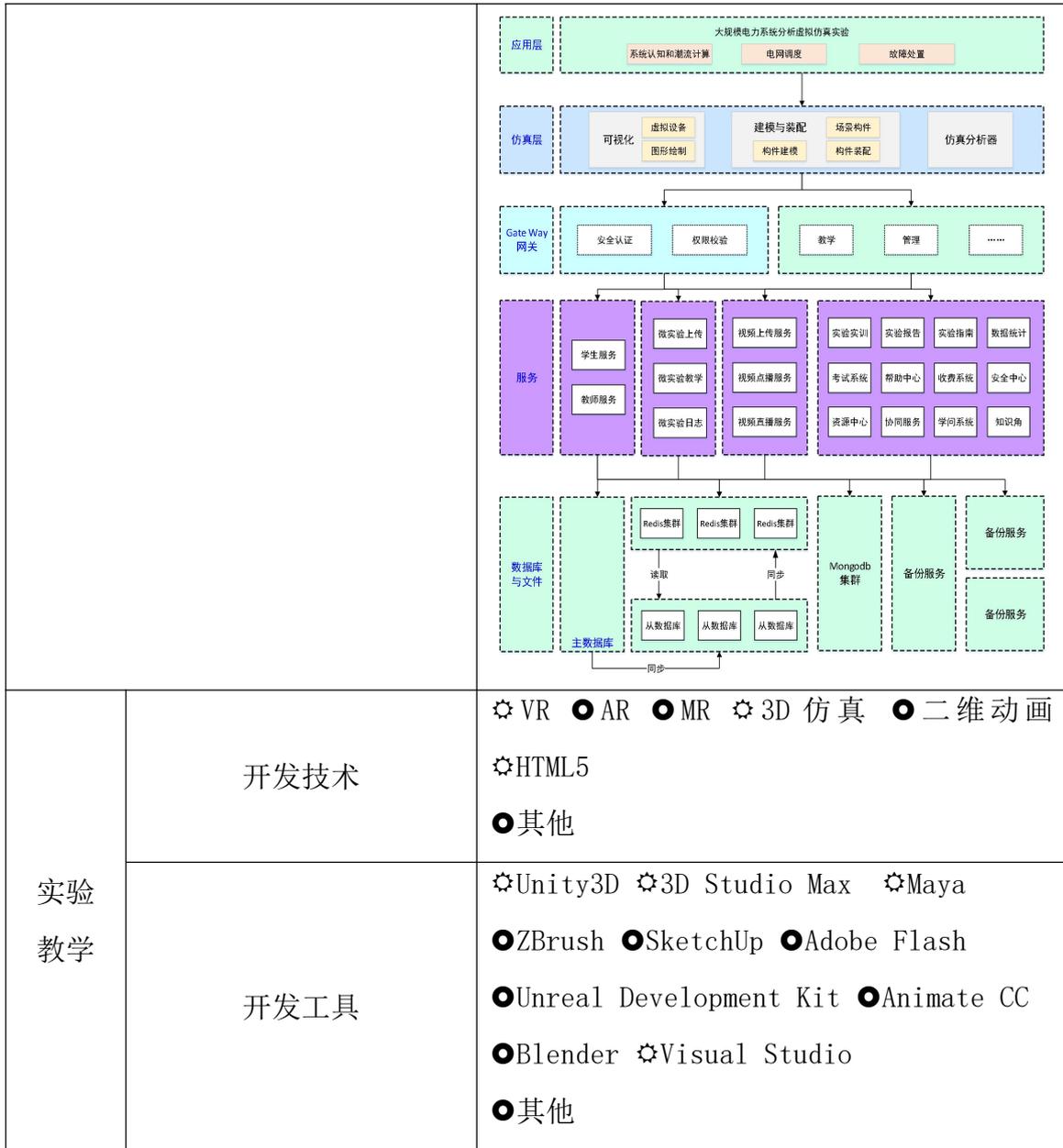
(2) 请附信息系统安全等级保护备案证明



7. 实验的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	本系统是基于 B/S 架构设计的虚拟仿真实验教学平台。系统采用轻量化的开发语言和模块化设计方案，部署简单、使用方便。系统支持分布式部署方案，可随使用情况动态扩充容量，基于容器化部署还可实现自动扩容，无需人为干预。

	<p>系统包含实验实训、实验报告、实验指南、数据统计、考试系统、帮助中心、收费系统、安全中心、资源中心、协同服务、学问系统和知识角等功能模块。系统除支持虚拟仿真实验外还可上传视频和其它文档资料，支持系统化课程体系学习。系统可对学生实验、学习数据做详细记录并分析每个学生的学习情况和整体学生知识掌握情况，实验报告系统可对学生提交的实验报告进行自动批阅也可由教师人工批阅或学生相互互评。</p> <p>系统用户可分为教师和学生两种角色。教师可发布实验资源、建设实验课程、设置课程共享信息、可查看发布课程的学习情况、可批阅学生实验报告和考试。学生可报名参与课程，可观看报名课程的视频操作课程的实验资源，可查看个人的学习情况，可评价学习课程、参与课程讨论，可参与实验报告互评等。</p>
--	---



	运行环境	<p>服务器 CPU <u>16</u>核、内存 <u>32GB</u>、磁盘 <u>1000GB</u>、 显存 <u>16GB</u>、GPU 型号 <u>NVIDIA GRID K1</u></p> <p>操作系统 <input checked="" type="radio"/>Windows Server <input checked="" type="radio"/>Linux <input checked="" type="radio"/>其他 具体版本：</p> <p>数据库 <input checked="" type="radio"/>Mysql <input checked="" type="radio"/>SQL Server <input checked="" type="radio"/>Oracle <input checked="" type="radio"/>其他</p> <p>备注说明（需要其他硬件设备或服务器数量 多于 1 台时请说明）</p> <p>是否支持云渲染： <input checked="" type="radio"/>是 <input type="radio"/>否</p>
	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）	<p>单场景模型总面数：40 万三角面</p> <p>贴图分辨率：512*512</p> <p>每帧渲染次数：30fps</p> <p>动作反馈时间：1/90s</p> <p>显示刷新率：60HZ</p> <p>分辨率：4K</p>

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

以现有的东南大学电气工程学院相关实验教学案例及真实电网运行案例为参照，在今后 3 到 5 年内，补充、更新和完善虚拟实验案例数据，并且进行扩充，具体如下表：

日期	描述
第一年	精细化完善故障环节，增加实际算例。
第二年	完善电源，扩充随机性强新能源模块。
第三年	完善电网拓扑，扩充直流输电模块。
第四年	完善静态算法，扩充暂态稳定计算模块。
第五年	扩充考虑天然气、热、冷、电的综合能源系统。

本项目在今后 1 年内面向高校和社会免费开放并提供教学服务，1 年后至 3 年内免费开放服务内容不少于 50%，3 年后免费开放服务内容不少于 30%。

(2) 面向高校、社会的教学推广应用计划

面向高校的推广应用计划，以教育部高等学校电气类专业教学指导委员会（秘书处设在东南大学）、东南大学国家级机电综合工程训练实验教学示范中心为依托，按计划向兄弟院校实施教学课程推广，做好面向高校的实验教学的线上保障工作，实现远程在线实验教学的目的。

面向社会的推广应用计划，与江苏省电力公司培训中心、南瑞集团培训中心、国电南自培训中心等企业对接，针对不同教学目的、不同的实验项目，实现实验项目定制服务，提供面向电力企业运行人员专业技能的虚拟仿真培训服务。

日期	推广高校数	应用人数	推广行业数	应用人数
第一年	3	500	1	200
第二年	5	500	3	200
第三年	10	500	5	200
第四年	20	1000	8	1000
第五年	30	1000	10	1000

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	新能源并网的电力系统调度虚拟仿真教学软件
是否与课程名称一致	<input checked="" type="radio"/> 是 <input 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
东南大学	<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
软件著作登记号	2020SR1633765
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。	
受理流水号	

中华人民共和国国家版权局
计算机软件著作权登记证书

证书号： 软著登字第6434737号

软件名称： 新能源并网的电力系统调度虚拟仿真教学软件
[简称：虚拟仿真教学软件]
V1.0

著作权人： 东南大学

开发完成日期： 2018年01月01日

首次发表日期： 2018年03月01日

权利取得方式： 原始取得

权利范围： 全部权利

登记号： 2020SR1633765

根据《计算机软件保护条例》和《计算机软件著作权登记办法》的规定，经中国版权保护中心审核，对以上事项予以登记。



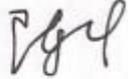
No. 08781608



2020年11月24日

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）：

2021年6月10日

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

中共东南大学委员会

关于第二批国家级一流本科课程推荐 的政治审查意见

经审查，东南大学申报国家第二批国家级一流本科课程推荐课程团队成员政治表现优秀，无违法违纪记录，无师德师风问题，无学术不端行为，五年内未出现过重大教学事故。由以上团队参加的东南大学虚拟仿真实验课程内容价值取向正确，对于我国政治制度以及党的理论、路线、方针、政策等理解和表述准确无误，对于国家主权、领土表述及标注准确。

同意该课程参与第二批国家级一流本科课程申报。

中共东南大学委员会
2021年6月2日



2. 课程内容学术性评价意见

课程内容学术性评价

中国承诺将 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和，以新能源为核心的新一代电力系统调度是电气领域面临的重大发展机遇，也是重大技术挑战。《新能源并网的电力系统调度虚拟仿真实验》聚焦于“新能源”和“电力系统调度”两个核心问题，具有重要的立项依据，体现了虚拟仿真的重要价值。

实验将实际电力系统调度面临的“调度对象难以实物化”、“调度过程难以可视化”、“调度效果难以形象化”的难题，通过虚拟仿真实验将现实中含巨大安全风险、强随机性新能源、强抽象操作的电力系统调度变得可重复、可分析、可探索，以江苏电网实际数据为蓝本，通过新能源复杂多变场景下的调度实验，让学生真正理解“工匠精神”和“创新精神”。

项目提出了“理论方法教学+虚拟实物仿真+工程实际操作”的实验架构，聚焦于电网调度、电压调整、频率调整、故障处置等系列核心问题，设计了“电力系统认知→正常状态电网调度→异常状态故障处置”递进式的实验环节，全面提升学生的理论理解、操作实践和创新能力。本实验整体达到了虚拟仿真与课程教学融合的要求。

学术审查小组签名:

 邓富金

3. 校外评价意见（可选提供）

关于《新能源并网的电力系统调度 虚拟仿真实验》的评价意见

新能源和电网是中国碳中和发展的关键，新能源并网及新环境下的电力系统调度是电气领域面临的重大技术挑战。《新能源并网的电力系统调度虚拟仿真实验》通过采用观察法、控制变量法、比较法、自主设计法等实验方法对电力系统核心问题进行精准刻画，以 3D 图形展示的手段准确表征抽象的电力系统对象和抽象的调度操作。学生在虚拟现实中进行调度仿真实验，学习电网调度、电压调整、频率调整、故障处置等系列核心知识，加强了学生对电力系统专业课程知识的理解和应用能力，加深了学生对于未来实现“双碳目标”的深入理解。本实验技术手段先进，实验方法新颖，能够真切反应电网实际调度过程中的实际操作流程，融合了知识教学和实验教学，实践意义和教学意义都得到了体现。本实验具有规律提取高阶性和探索创新性等新实验元素，体现了对学生的知识应用高挑战要求，本实验整体高水平达到了虚拟仿真实验的要求。

单位名称：浙江大港电气工程学院

2021.6.10

《新能源并网的电力系统调度虚拟仿真实验》

评价意见

《新能源并网的电力系统调度虚拟仿真实验》融合国家“双碳目标”的关键元素，聚焦于新能源并网下的电力系统调度、电力系统调整及故障最优处置等核心问题，具有重要的立项意义。

实验针对电力系统调度过程、对象及效果难以实物化的难题，通过虚拟仿真手段将现实中的电力系统调度实验移植到电脑环境中，使得实验过程变得可重复、可分析、可探索。并且将现实中复杂多变的新能源发电形象化，同时将抽象复杂的电力系统调度过程进行可视化，体现了虚拟仿真的重要价值。

项目提出了“理论教学方法+虚拟仿真实验+工程实际操作”的实验体系全面提升学生的理论理解、操作实践和创新能力，并且以江苏电网实际数据为蓝本开展实验，具备较好的教学意义和实践意义。本实验也可以作为从事新能源和电力调度的科研人员和工程人员的调度基础知识培训系统，值得在全国高校和科研院所推广。

国电南瑞科技股份有限公司南京电网调控技术分公司

2021.6.10