

# 省级一流本科课程申报书

## (虚拟仿真实验教学课程)

课程名称：双碳背景下抽水蓄能虚拟仿真实验

专业类代码：080501

负责人：郭鹏程

联系电话：15191916928

申报学校：西安理工大学

填表日期：2022 年 4 月 15 日

推荐单位：西安理工大学

陕西省教育厅制

二〇二一年四月

## 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	双碳背景下抽水蓄能虚拟仿真实验	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)	抽水蓄能技术、水电站、水轮机、水力机组安装与检修、发电厂自动化、发电机组自动调节、水轮机结构分析与设计		
性质	<input type="radio"/> 独立实验课 <input checked="" type="radio"/> 课程实验		
实验对应专业	能源与动力工程、水利水电工程		
实验类型	<input checked="" 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 checked="" 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. 2021 学年，220 人 2. 2020 学年，220 人		
有效链接网址	（要求填写标准 URL 格式的实验入口网页，不允许仅为文件下载链接）		

## 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	郭鹏程	1975.11	西安理工大学	院长	教授	15191916928	guoyicheng@xaut.edu.cn	项目总负责、课程主讲
2	吴罗长	1978.9	西安理工大学	副院长	副教授	15102901911	wlcle@xaut.edu.cn	课程主讲、实验组织实施
3	郑小波	1975.7	西安理工大学	系主任	副教授	13636713209	zhengxbb@163.com	实验计划实施
4	赵道利	1973.7	西安理工大学	无	教授	13992832339	zhaodaoli@126.com	实验指导
5	余向阳	1975.7	西安理工大学	系副主任	副教授	13096918327	13096918327@163.com	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		
6	赵亚萍	1986.10	西安理工大学	无	讲师	在线教学服务		
7	门闯社	1987.8	西安理工大学	无	讲师	在线教学服务		
8	颜建国	1987.8	西安理工大学	学科秘书	副教授	持续改进计划实施		
9	孙帅辉	1984.12	西安理工大学	系副主任	副教授	持续改进计划实施		
10	孙维鹏	1988.11	西安理工大学	无	讲师	推广应用		
11	孙龙刚	1988.2	西安理工大学	无	师资博士后	推广应用		
12	于龙	1989.1	西安理工大学	无	助理实验师	运行维护		
13	明尧	1989.7	西安理工大学	无	助理实验师	运行维护		
团队总人数：13 人，其中高校人员数量：13 人，企业人员数量：0 人								

### 2-3 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）

负责人现任西安理工大学水利水电学院院长，兼任中国水利学会理事、全国能源行业水电水力机械标准化技术委员会委员、陕西省高等学校教学指导委员会能源与动力类工作委员会委员、陕西省水力发电工程学会常务理事，国际水利与环境工程协会（IAHR）会员，《Journal of Hydrodynamics》编委、《农业工程学报》编委、《排灌机械工程学报》编委、《水动力学研究与进展》副主编。

负责人一直从事流体机械流体动力学及优化设计、水力机械振动与稳定性控制、清洁能源高效利用与运行安全等方面的教学科研工作。近年来，先后主持国家自然科学基金重点项目 1 项，国家自然科学基金面上及青年基金 3 项，陕西省重点科技项目 2 项，其他各类项目 60 余项。已发表学术论文 100 余篇；荣获 2020 年度国家科技进步二等奖 1 项（排名第 3），2014 年度国家科技进步二等奖 1 项（排名第 4），2019 年度陕西省科技进步一等奖 1 项（排名第 3），2011 年度陕西省科学技术一等奖 1 项（排名第 3），2013 年度陕西省教学成果奖一等奖 1 项（排名第 3）；2016 年荣获第十一届陕西青年科技奖。

2021 年，负责人获批西安理工大学“三全育人”综合改革示范学院培育项目，全面落实立德树人的根本任务。深度推进“政-校-企”多方协同融合创新，建设多方协同的新工科实践平台。2019 年负责人牵头申报并获批陕西省水利水电虚拟仿真实验教学中心，2020 年负责人带队与国网华东天荒坪抽水蓄能有限责任公司签署了联合共建产学研合作协议，有力推动了新工科实践教学。

负责人 2019 年申报的“新工科背景下地方院校水利类专业本科大类培养新模式研究”获批陕西省高等教育教学改革重点项目（编号：19BZ022）；负责人所在团队申报的“水利水电类应用型创新人才工程实践教学体系的构建与实践”荣获陕西省教学成果奖一等奖；所负责的能源与动力工程专业 2019 年获批为国家一流本科专业建设点。

已累计指导博士生 4 人，硕士生 56 人。近 5 年，负责人所指导的博硕士研究生中，获评全国高等学校水利类专业优秀硕士学位论文 1 篇，校级优秀硕士论文 3 篇，研究生获国家奖学金 5 人。2017 年负责人荣获首届“全国水利工程专业学位研究生优秀指导教师”荣誉称号。

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）

西安理工大学能源与动力工程专业秉承学校立足西北、服务西部、面向全国  
的办学定位，坚持以立德树人为根本，旨在培养具备良好综合素养和创新精神  
的水电能源行业高级工程技术及管理人才。专业于 2006 年获陕西省名牌专业，  
2007 年获批国家级特色专业、2008 年获国家级教学团队,2017 年获批陕西省一流  
专业建设培育专业，2019 年获批国家“双万计划”一流本科专业建设点。专业依  
托的水利工程是国务院首批硕士学位授权点和全国重点学科，具有 1 个国家重  
点实验室、1 个国家级实验教学示范中心、4 个省部级重点实验室和实验教学示  
范中心。

我国正处于能源绿色低碳转型发展的关键时期，对调节电源的需求更加迫  
切。国家能源局 2021 年八月发布《抽水蓄能中长期发展规划（2021-2035  
年）》，提出加速推进抽水蓄能，以适应新型电力系统建设和大规模高比例新能源  
发展需要，助力实现碳达峰、碳中和目标。

在服务碳达峰碳中和、构建新型电力系统的背景下，西安理工大学以“水利水  
电国家级实验教学示范中心”为依托，围绕传统实验教学的局限性和现代水利人  
才培养的新需求建立“抽水蓄能虚拟仿真实验课程”。实验以抽水蓄能电站的应用  
前景及经济效益为切入点，实现对课程“水力-机械-电气-控制-运维”五大知识模  
块的直观化教学与实践，使学生充分了解到抽水蓄能电站在电力系统中的重  
要性，能够正确认识本专业领域的复杂问题，准确理解相关问题的特殊需求；能够  
理解和评价相关工程实践活动对环境、社会可持续发展的影响。并融合多年教学  
和科研成果，创新性的设计并构建了“抽水蓄能虚拟仿真实验”。该虚拟仿真实  
验课程包含抽水蓄能电站漫游认知、抽蓄机组部件与安装、抽水机组运行与调度以  
及抽水机组试验研究 4 个实验项目。该实验围绕抽水蓄能电站的实际运行原理，  
以“机组结构认知—水力原理—实验实操”为主线。

（1）实验的必要性及实用性

1) 必要性

抽水蓄能具备“源网荷储”全要素特性，在保障大电网安全、服务清洁消纳、

促进电力系统优化运行中发挥着“三大基础作用”，尤其是在碳达峰碳中和背景下，国家对抽水蓄能电站的需求更加强烈。《抽水蓄能技术》作为能源与动力工程专业的一门重要的必修课，对于课程的高效教授是国家抽水蓄能人才的培养及抽水蓄能大力发展的基础。而目前抽水蓄能技术存在的主要问题是实验实践教学环节的缺乏，其主要原因有：

① 抽水蓄能机组是水力-机械-电气-控制等系统的高度集成，试验场地和试验设备难以满足；

② 抽水蓄能电站机组的安装和真机试验成本高、周期长；

③ 抽水蓄能机组运行工况复杂，实验原理、实验过程的实体化演示比较困难难以通过模型机实现其全特性的准确演示；

④ 模型机的抽水蓄能电站无法做到机组抽水蓄能发电系统的全景可视化。

因此《抽水蓄能虚拟仿真实验》的建设对于抽水蓄能技术的高效教学具有重要的意义。采用虚拟仿真技术可以有效的解决试验场地和试验设备难以满足的难题，突破实物教学难以展示内部复杂结构的局限，更直观的展示抽水蓄能电站的结构、安装及运行原理和特性，通过虚拟仿真开展具有探索性和设计性的抽水蓄能电站发电工况、抽水工况以及过渡过程演示实验，不仅可以加深学生对抽水蓄能技术教学内容的理解，还有利于培养学生的自主创新设计能力，培养学生的科学思维。

## 2) 实用性

利用各种现代信息技术和优质实验资源建立的虚拟仿真实验突破了实验教学对客观条件的依赖性，通过模拟虚拟实验环境，将知识可视化呈现，调动学生参与实验实践活动的积极性和主动性，使学生对那些真实实验难以开展的实验机理和实验现象进行深入了解，为学生提供具有良好沉浸感和获得感的虚拟仿真实验环境成为弥补实际试验存在问题、激发学生学习兴趣、增强学生实践能力的重要手段。

### (2) 教学设计的合理性

本实验从实际的抽水蓄能电站设计、施工安装、运行过程中提炼了不同的实验场景、设置多个实验环节、采用多元化的实验方式构建了涵盖结构认知、实验实操、知识点总结的全过程虚实结合的实验过程，其真实性及合理性表现如下：

① 高度还原抽水蓄能电站全景，确保实验环境的合理性

以某抽水蓄能电站为原型，基于虚拟现实、3D 建模等技术，实现水轮发电机系统、水工建筑物等核心要素的三维建模，为学生提供了沉浸式抽水蓄能虚拟仿真实验环境。

② 基于实际抽水蓄能机组运行原理及学生能力培养需求设计实验，确保实验内容的合理性

围绕抽水蓄能电站的发电工况、抽水工况、制动工况等全特性过程的基本原理及运行过程，结合课堂教学中的相关典型知识点，实现全过程贯通的虚拟仿真实验，增强了实验的综合性和高阶性，从而使学生具备开展抽水蓄能设计及运行所需要的知识和能力。

③ 采用多元化自主选择的实验方式，确保实验方法的合理性

针对不同的实验需求和实验特点，建立任务驱动的探索式实验、全景感知的沉浸式实验、交流互动的研讨式实验、过程容错的评估式实验等多元实验方式，促使学生“动”起来，主动思考、发现问题、分析问题、自主选择实验方法解决问题，使实验“活”起来，确保实验方法的合理性。

本实验实现教学实践与行业应用的融合，提升学习兴趣以及培养学生主动发现问题和分析问题的能力，可以真正让学生学有所用。

(3) 实验系统的先进性

本实验以某抽水蓄能电站为背景，以先进的面向开放共享的虚拟仿真教学平台为支撑，突破传统教学的瓶颈。系统采用了 B/S 架构，通过多媒体、三维建模、人机交互，虚拟现实、云计算等现代信息技术与软件开发相结合的方式，构造了抽蓄电站机组安装仿真环境，实现了抽水蓄能电站的虚拟运行，并模拟演示了抽水蓄能电站的发电工况、抽水工况、制动工况等全特性过程。

3-2 实验教学目标（实验后应该达到的知识、能力水平）

我国“碳达峰、碳中和”战略对抽水蓄能电站的发展提出了更高要求，以消纳风电、太阳能等新能源电力。抽水蓄能发电的高速发展，对能源动力专业人才的培养提出了更高的要求，不仅要求学生具有扎实的理论基础，更需要学生具备优秀的工程意识、实践能力和职业操守。

本实验旨在通过抽水蓄能电站全景感知、电站关键部件安装、电站虚拟试运



行、电站工况虚拟调节及监测等一系列交互性实验操作，夯实学生抽水蓄能发电技术的专业知识，增强学生知识融会贯通和综合应用水平，提升学生实践能力和创新思维，提高学生解决抽水蓄能发电工程中各类实际问题的能力，培养学生的社会责任感和职业操守。实验教学目标如下：

(1) 知识目标

通过全景感知对抽水蓄能电站的选址、构成、及各类水工建筑物的布局有直观的认识和理解，能其蓄能和发电的流程有直观的认知。并通过电站关键部件安装，电站虚拟运行调节等实验掌握抽水蓄能电站中水泵水轮机及电动发电机的结构和特性、电气设备的选用以及电站运行调控的原理，帮助学生掌握抽水蓄能电站的重点和难点知识，促进复杂问题的课程教学落地。

(2) 能力目标

通过抽水蓄能电站交互性操作实验，培养学生创新意识和动手能力；通过问题驱动，培养独立思考、发现问题、分析问题和解决问题的能力；将课程教学内容的形象化、演示化和交互化，通过虚实结合，提升学生实践能力和创新思维，培养学生分析实际抽水蓄能工程问题的能力。

(3) 素质目标

通过介绍我国水电事行业（尤其是抽水蓄能领域）的伟大成就，激发学生的专业自豪感和为水电事业奉献的情怀；通过多人协作实验，培养学生合作意识和团队精神；通过抽蓄水电站调控事故模拟，提升学生工程伦理道德、敬业精神，养成职业操守。

### 3-3 实验课时

(1) 实验所属课程课时：32 学时

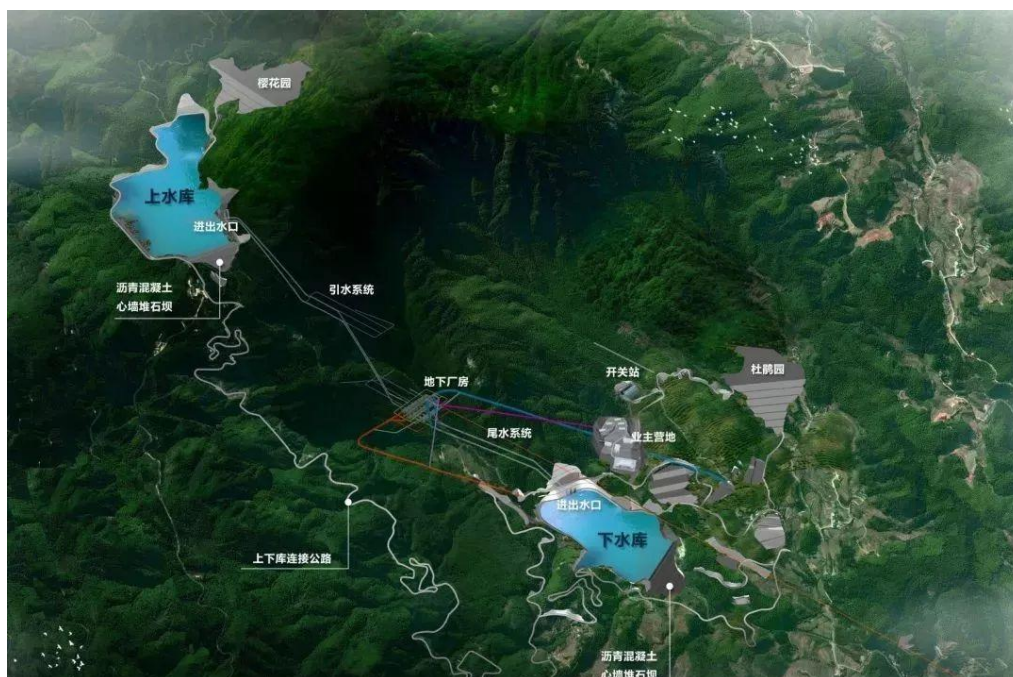
(2) 该实验所占课时：6 学时

### 3-4 实验原理

(1) 抽水蓄能电站全景认知

①通过观看抽水蓄能电站相关微视频，了解建设抽水蓄能电站的重要意义，培养学生“绿水青山就是金山银山”的绿色发展理念；

②通过动画鸟瞰模式，查看抽水蓄能电站主要建筑物的总体布置情况，了解抽水蓄能电站的选址原则和建筑物布置特点；



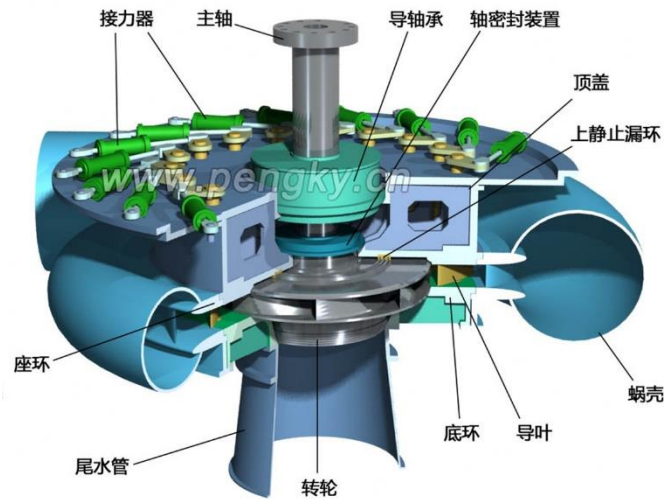
某抽水蓄能发电厂建筑物布置图

③实地漫游在建/已建抽水蓄能电站。了解抽水蓄能电站主要建筑物的结构和功能，学习主要建筑物设计特点及设计依据。

## (2) 抽水蓄能机组部件结构认知与安装调整工艺

①通过虚拟仿真实验系统，使学生了解抽水蓄能机组任一零、部件的三维结构，所在机组中的位置、作用及与相邻部件的装配关系，实现对抽水蓄能机组结构的全面认知；

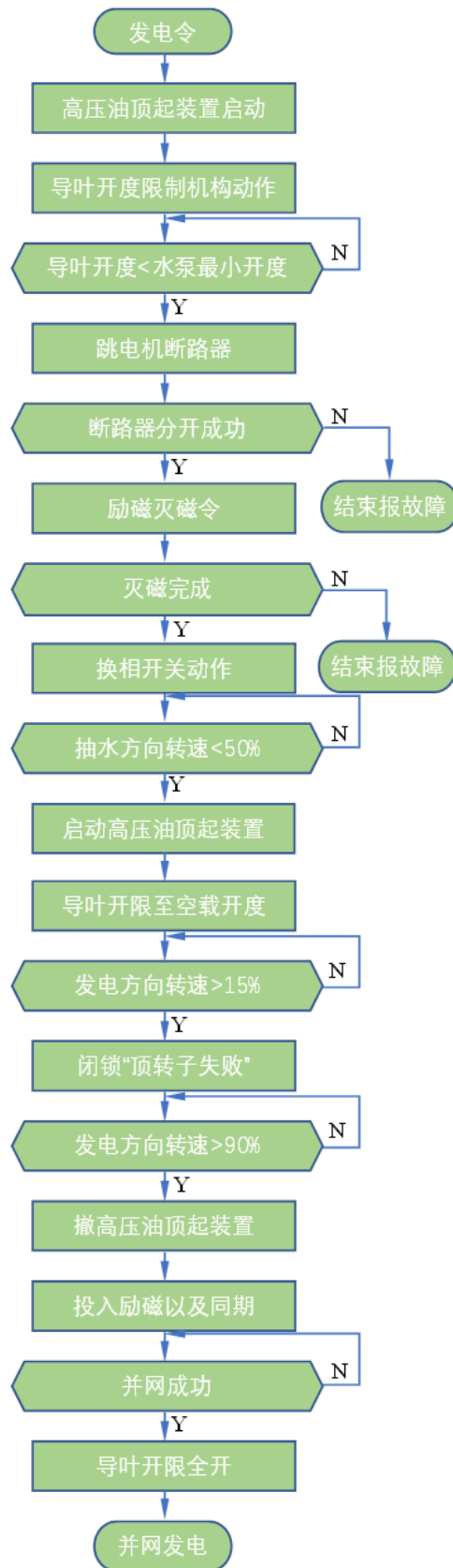
②通过工艺具体说明和三维、多视角的讲解与展示，学习机组埋入部件（尾水管、蜗壳、基础环、机坑里衬等）、导水机构（导叶、顶盖、底环、控制环等）、转动部件（转轮、主轴等）、发电电动机、推力轴承、各导轴承、上机架、下机架等部件的安装过程，对机组重要的安装工艺，如：机组中心调整方法及工艺、导叶间隙调整方法及工艺、转轮周向间隙调整方法及工艺、机组轴线调整及工艺等，进一步展示，加深学生对这些重要部件的安装和调整工艺的理解。



抽水蓄能机组结构

### (3) 抽水蓄能机组运行原理

认知抽水蓄能机组运行原理，学习机组工况转换过程，加深对机组工况转换的理解。抽水工况转发电工况时，需要经过旋转方向切换过、导叶控制规律变化、功率方向变化、励磁控制策略变化等过程，该过渡过程包括水泵工况到停机、停机到发电工况两个转换过程。其中抽水转发电工况过程如下：



水泵工况到发电工况转换过程

#### (4) 抽蓄机组甩负荷试验

甩负荷试验的目的是校验机组调节系统动态特性的品质，考核机组在已选定的空载运行参数下大波动调、节过程的稳定性和速动性，最终是考查调节系统动态质量，根据甩负荷时所测得机组转速上升率、蜗壳水压上升率和尾水管真空度等，检查是否满足调节保证计算要求，同时根据试验测得参数绘制调节系统静特性图。

甩负荷情况下的过渡过程是抽水蓄能机组大波动过程需要着重考虑的，可用抽蓄蓄能机组模型来描述。发电机组的旋转运动可用旋转刚体运动方程得到：

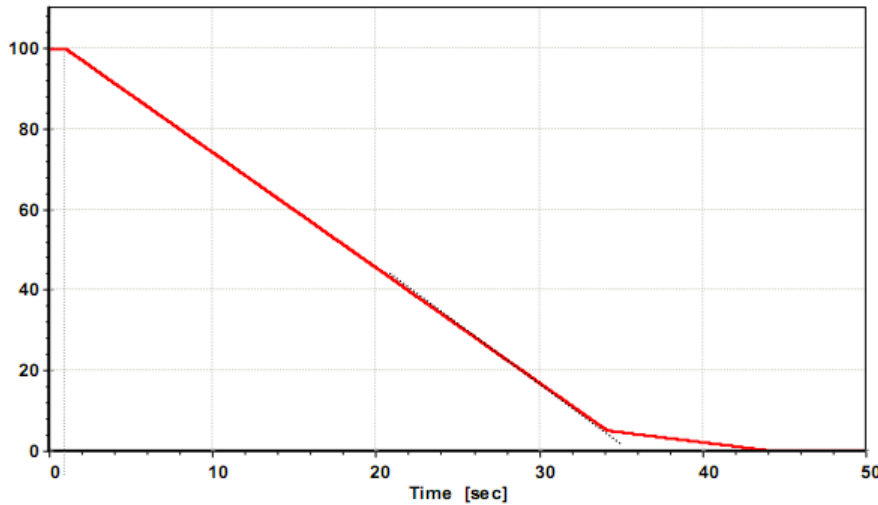
$$J \frac{d\omega}{dt} = M_t - M_g$$

对该式进行积分可得到机组甩负荷情况下的转速变化，使用梯形积分公式，自  $t - \Delta t$  至  $t$  积分得到：

$$\omega_t - \omega_{t-\Delta t} = \frac{M_t + M_{t-\Delta t}}{2J} \Delta t$$

式中下标  $t$  表示参数在  $t$  时刻的值，下标  $t - \Delta t$  表示参数在  $t - \Delta t$  时刻的值。已知  $\omega = \frac{\pi n}{30}$ ， $J = \frac{GD^2}{4g}$ ，设水轮机出力  $P_t$  在  $\Delta t$  内为线性变化，已知  $M_t = 9.555 \frac{P_t}{n}$ ，带入刚体运动方程可得抽水蓄能机组转速变化：

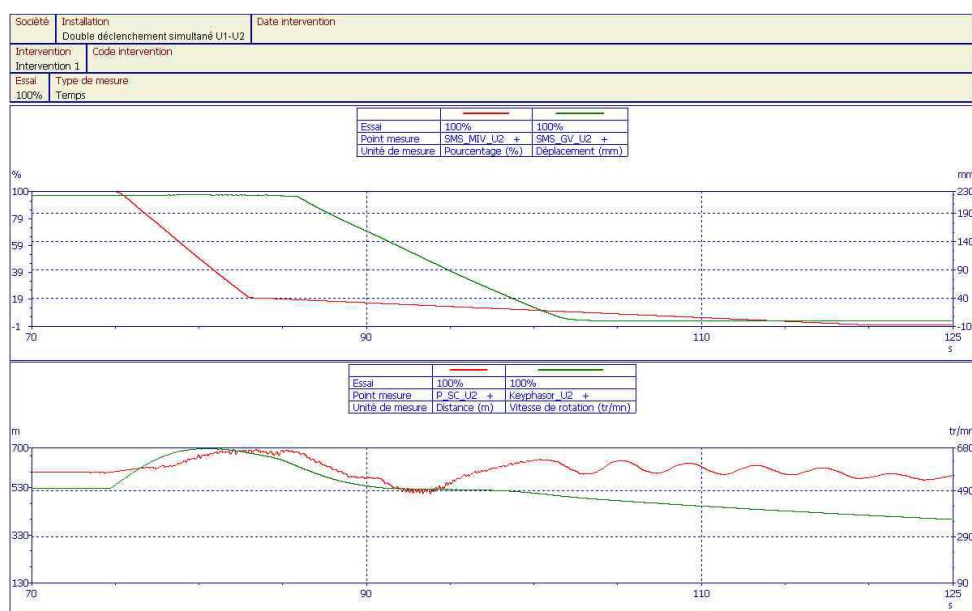
$$n_t = \sqrt{n_{t-\Delta t}^2 + \frac{1790}{GD^2} \frac{P_t + P_{t-\Delta t}}{2} \Delta t}$$



抽水蓄能机组甩负荷导叶关闭规律(红线为水轮机工况；蓝线为水泵工况，两者重合)

对于低比转速水泵水轮机，机组甩负荷时即便导叶拒动，由于机组的制动作业而产生的压力上升也将达到相当高的数值，并附有较大的压力脉动，由在此选择导叶关闭规律时宜充分重视导叶关闭与机组本身制动的联合作用。基本每种导叶关闭规律产生的第一个压力波均有两个峰值，由于机组本身制动作用及导叶关闭作用而产生的两个压力波峰，因此在进行过渡过程计算时宜先进性甩负荷导叶拒动工况的试算，在结合试算结果拟定导叶的关闭规律。

过渡过程中机组转速上升及压力管道系统压力上升主要与机组关闭时间、压力管道特性、以及机组惯性时间常数等有关。加大管径或减短管道长度将使得  $\sum l v$  减小，使要上升值下降；或增加压力管道壁厚提高压力管道的设计压力，可使在相同  $\sum l v$  值得条件下相应减小导叶关闭时间  $T_a$ ，使机组转速上升满足要求。



某蓄能电站甩 100%负荷波形

知识点：

1. 抽水蓄能电站选址原则及建筑物布置特点；
2. 抽水蓄能电站主要建筑物特点及其功能；
3. 抽水蓄能机组零部件结构、位置、作用及与相邻部件的装配关系；
4. 抽水蓄能机组零部件安装过程及安装工艺；
5. 抽水蓄能机组运行原理；
6. 水泵工况到停机、停机到发电工况转换过程；
7. 抽蓄机组甩负荷试验目的；
8. 抽水蓄能机组甩负荷导叶关闭规律。



**(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）

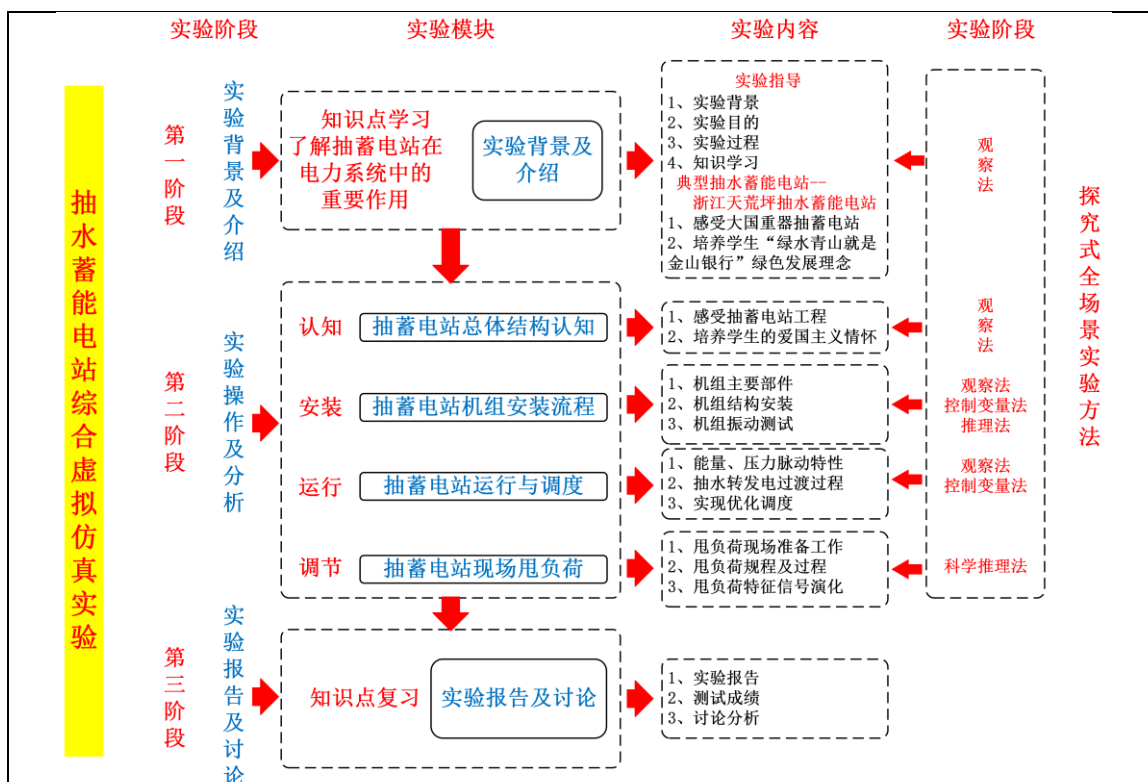
1. 实验场景仿真。对抽水蓄能电站周边地形、水域环境、电站主要建筑物及布局真实还原，使学生能够沉浸于抽水蓄能电站，实现对抽水蓄能电站全面的认知；
2. 实验流程模拟。模拟抽水蓄能机组零部件安装真实流程，包括机组总体结构、安装过程、安装工艺认知，使得教学内容更加丰富全面；现场甩负荷试验流程高度还原，包括测试仪器安装、设备布置、参数设置、数据采集、数据处理、结果呈现等，实现“真实、动态、实时”的实操情景，便于学生掌握实验的流程与技术原理。
3. 实验数据支撑。本项目抽水蓄能机组甩负荷试验负荷变化波形、机组导叶关闭规律来自于实际抽水蓄能电站甩负荷试验及抽蓄机组精确模型，模型及试验数据库可以保证虚拟实验得实验结果真实、有效。

### 3-5 实验教学过程与实验方法

#### （一）实验教学过程

打开抽水蓄能电站综合虚拟仿真实验教学网页平台，学生可输入已分配好的账户和密码，实现登陆。网页界面下学生可根据个人需求及学习进度，点击响应模块，进入相应的学习场景中。

《抽水蓄能电站综合虚拟仿真实验》分为抽蓄电站总体结构认知、抽蓄电站机组结构与安装、抽蓄电站运行与调度、抽蓄电站现场甩负荷四大模块，实施完整的实验教学过程，如图所示。



实验教学过程示意图

### (1) 抽水蓄能电站总体结构认知模块

本模块旨在通过抽水蓄能电站的漫游使学生了解抽水蓄能电站工程选址与总布置。

① 学生首先通过观看抽水蓄能电站微视频，初步了解讲解抽水蓄能电站在新型电力系统中的作用、发展抽水蓄能电站的重要意义。培养“绿水青山就是金山银山”的绿色发展理念。

微视频内容应包括双碳目标及行动计划、新型电力系统（互补发电系统）、绿水青山就是金山银山理念，抽水蓄能电站的功能特点。

② 探究法和观察法，通过漫游使学生了解抽水蓄能电站主要建筑物和机电设备的总体布置情况和功能，使学生形成对抽水蓄能电站的总体认知。

- 根据系统给定的抽水蓄能电站仿真模型，通过动画鸟瞰模式，探究抽水蓄能电站上水库、下水库、厂房、引水系统等主要建筑物的总体布置情况，了解抽水蓄能电站主要建筑物的布置特点，自主规划漫游路线。
- 分别沿上水库和下水库路线进行漫游，观察抽水蓄能电站进出水系统的主要结构组成，了解其功能。
- 沿发电厂房路线进行漫游，观察抽水蓄能电站机电设备的分层布置特点，



认识主要机电设备及其功能，**体验抽水蓄能电站的多种运行状态**，了解抽水蓄能电站抽水和发电两种工作方式的水流运动情况。

该模块由宏观至微观，由全局至细节，允许学生任意角度和剖面观察抽水蓄能电站主要建筑物和机电设备，深入观察和探究其结构组成，理解其功能，有效提升学生的参与感和现场感。

### **(2) 抽蓄电站机组安装流程模块**

该模块通过讲解演示、引导学习和自主操作的模式，使学生更好地了解抽水蓄能机组各部件的结构、安装流程及工艺，加深对抽水蓄能机组各部件结构的全面认知，进一步了解抽水蓄能机组主要零部件的作用、工作原理及安装调试工艺。实验重点构建抽水蓄能机组各主要安装及调整工艺的虚拟实验过程，学生可以根据实验中出现的安装问题提出调整方法并计算需要调整的量值。实验系统记录学生实验操作过程、选择的调整方法、计算量值的正确性，对学生实验效果进行全面考核，考核结果与自主安装实验操作等内容一并纳入实验的结果评价中。

### **(3) 抽蓄电站运行与调度模块**

该模块使学生全面掌握抽蓄电站各种复杂运行工况，通过水泵水轮机性能试验了解水轮机工况及水泵工况特性曲线的绘制方法及其表征意义，能够了解不同运行工况下水泵水轮机压力脉动及空化发展演化过程。进一步，以水泵抽水工况转水轮机发电过渡过程为例，使学生了解典型过渡过程操作规范、流程以及水力性能参数如水力效率、流量、转速、扭矩等参数的变化，实现电网优化调度的过程。

### **(4) 抽蓄电站现场甩负荷模块**

该模块以抽蓄电站现场甩负荷实验为基础，使学生掌握水泵水轮机在既定的导叶关闭规律下进行甩负荷的流程及机组转速上升率、尾水管真空度、出力波动、压力和流量信号震荡幅值等参数的变化过程，检查机组甩负荷是否满足调节保证要求。进一步，要求学生掌握甩负荷过程中提取信号的表征形式及其物理意义，并能独立进行处理和分析。

## **(二) 实验教学方法**

### **(1) 任务驱动，合作探索**

以抽水蓄能电站运行与调节为导向，开展电站关键部件安装，电站虚拟运行

调节等，探究抽水蓄能电站中的水泵水轮机在多种工况下的运行特性，并掌握电动发电机的结构和特性、电气设备的选用以及电站运行调控的原理。

## (2) 虚拟场景，沉浸体验

通过抽水蓄能电站高度还原与虚拟仿真，学生可以沉浸式感知抽水蓄能电站全过程，开展抽水蓄能电站全过程运行仿真，进一步巩固知识点，提升学生动手操作技能。

## (3) 多种平台，交流研讨

建立微信群、QQ 群、开放实验室等多种实验学习交流平台，通过人机互动、师生互动、生生互动，小组研讨，讨论分析实验过程及结果，加深对理论知识的理解，促进实验学习效果。

**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 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	抽水蓄能电站整体竣工面貌与工程布置	5 分钟	2 分	2 分	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input checked="" type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
2	抽蓄电站典型工程进行漫游认知	10 分钟	8 分	8 分	
3	水轮机部件认知及组装考核	10 分钟	5 分	5 分	
4	尾水安装	4 分钟	2 分	2 分	
5	座环蜗壳安装	8 分钟	4 分	4 分	
6	机坑里衬、接力器基础安装	5 分钟	2 分	2 分	
7	底环安装	4 分钟	3 分	3 分	
8	转动部件安装	10 分钟	5 分	5 分	
9	导水机构安装	4 分钟	2 分	2 分	
10	定子组装及安装	8 分钟	6 分	6 分	
11	下机架组装及	4 分钟	2 分	2 分	

	安装					
12	发电机轴安装	8 分钟	6 分	6 分		
13	转子组装及吊装	10 分钟	8 分	8 分		
14	上机架组装及吊装	4 分钟	2 分	2 分		
15	上导轴承安装	4 分钟	3 分	3 分		
16	下导轴承安装	3 分钟	2 分	2 分		
17	主轴密封及水导轴承安装	5 分钟	2 分	2 分		
18	水轮机其他附件安装	8 分钟	2 分	2 分		
19	发电机整体回装	4 分钟	2 分	2 分		
20	球阀安装	2 分钟	2 分	2 分		
21	抽水转发电流程动作	2 分钟	3 分	3 分		
22	进入抽水至发电工况转换试验环节	6 分钟	5 分	5 分		
23	工况转换试验实验结束，查看实验结论	2 分钟	2 分	2 分		
24	机组空载运行，向调度申请并网带 25% 负荷	2 分钟	2 分	2 分		
25	1 号机组监控系统自动执行空载—发电流程	1 分钟	1 分	1 分		
26	观察记录该负荷下的各运行参数	1 分钟	2 分	2 分		
27	调节机组运行时间	1 分钟	1 分	1 分		
28	检查监控、调	1 分钟	1 分	1 分		

	速、励磁、保护各系统功率信号正常				
29	向调度申请甩负荷试验	1 分钟	1 分	1 分	
30	选择实验人员	1 分钟	1 分	1 分	
31	在监控系统 LCU1 A1 柜按下 SB3 电气事故停机按钮	1 分钟	1 分	1 分	
32	观察发电机辅助设备是否工作正常，机组是否达到空载稳态	1 分钟	2 分	2 分	
33	测录甩负荷过程，机组转速、压力脉动、机组振动与主轴摆度等参数	1 分钟	2 分	2 分	
34	检查导叶关闭规律是否正常，检查机组转速上升率和压力上升率	1 分钟	1 分	1 分	
35	继续进行机组甩 50%、75%、100% 负荷试验	8 分钟	5 分	5 分	
合计		150 分钟	100 分	100 分	

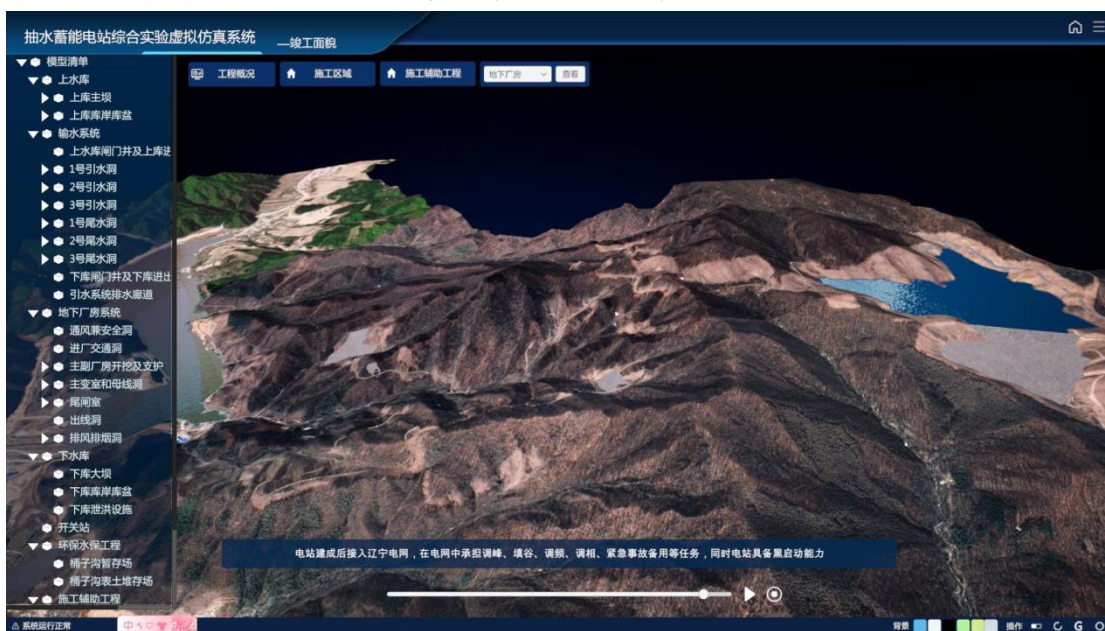
## （2）交互性步骤详细说明

学生通过注册获得账号和密码，登录虚拟仿真实验网站进入实验项目。根据教师的要求和虚拟仿真实验项目的实验帮助，学生可自主进行实验，教师可根据

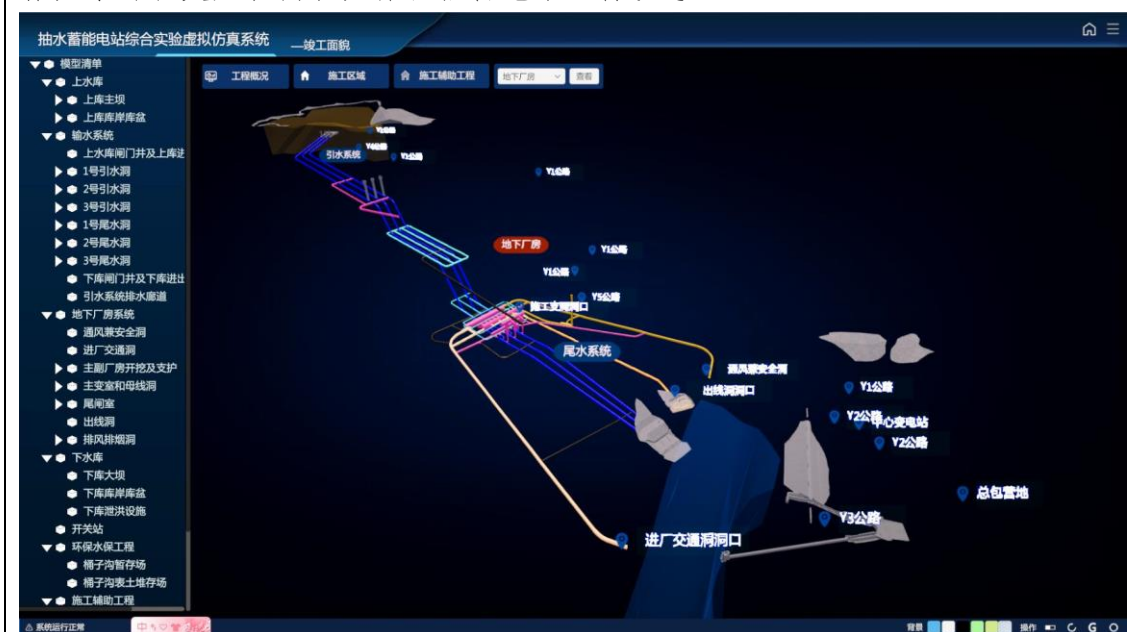
学生虚拟仿真实验的操作、实验报告及实验测试题目对学生的实验效果进行综合评判。

## 实验模块一：工程总布置

【交互性步骤一】点击选择进入实验，进入实验鸟瞰模式。了解查看抽水蓄能电站整体竣工面貌，学习布置原则，分析了解水文、气象、地形、工程地质和水文地质条件，施工条件，环境保护及运行要求等知识点。

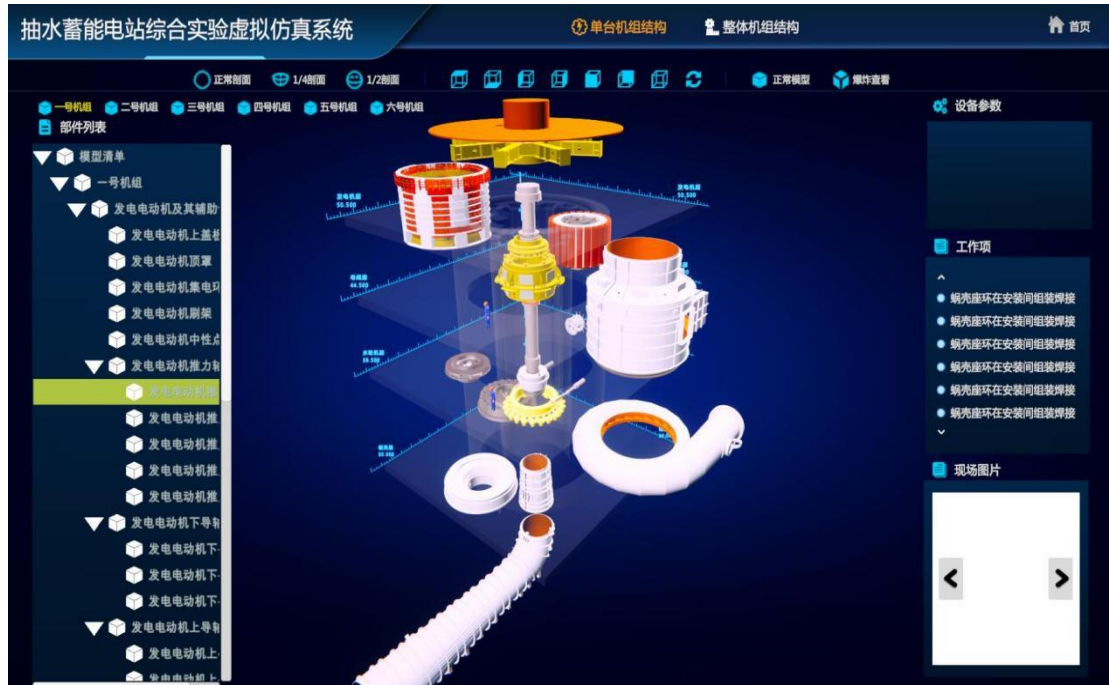


【交互性步骤二】点击第一人称漫游，对抽蓄电站典型工程进行漫游认知操作，学习相关知识内容，体验抽蓄电站运行状态。



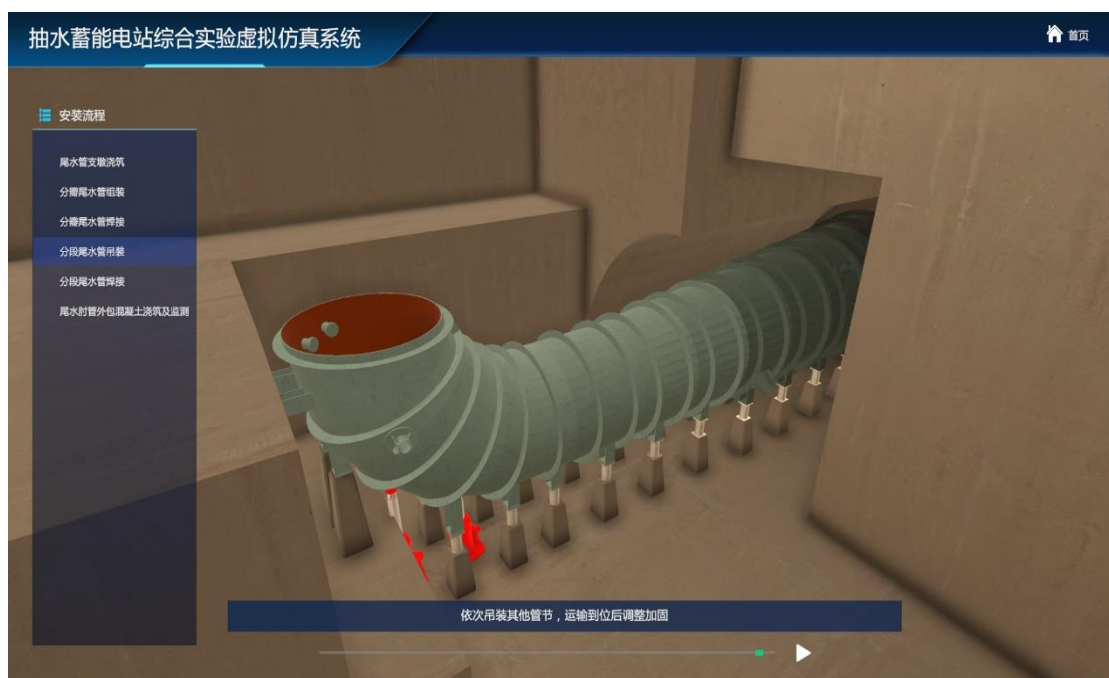
## 实验模块二：机组安装流程工艺

【交互性步骤三】进入机组安装流程工艺，点击选择机组整体安装工艺流程图，查看机组安装准备工作和相关标准。



【交互性步骤四】点击“尾水安装”进入尾水安装工艺环节。

桥机吊装出水口节尾水管到运输台车上，运输台车将尾水管运至设计里程位置，用千斤顶、链条葫芦调整，检查两端管口尺寸、高程，合格后进行加固。依次吊装其他管节，运输到位后调整加固。





【交互性步骤五】点击“座环蜗壳安装”进入座环蜗壳安装工艺环节。



【交互性步骤六】点击“机坑里衬、接力器基础安装”，进行机坑里衬、接力器基础安装工艺环节。



【交互性步骤七】点击“底环安装”，进行底环安装工艺环节。



【交互性步骤八】点击“转动部件安装”，进行转动部件安装工艺环节。

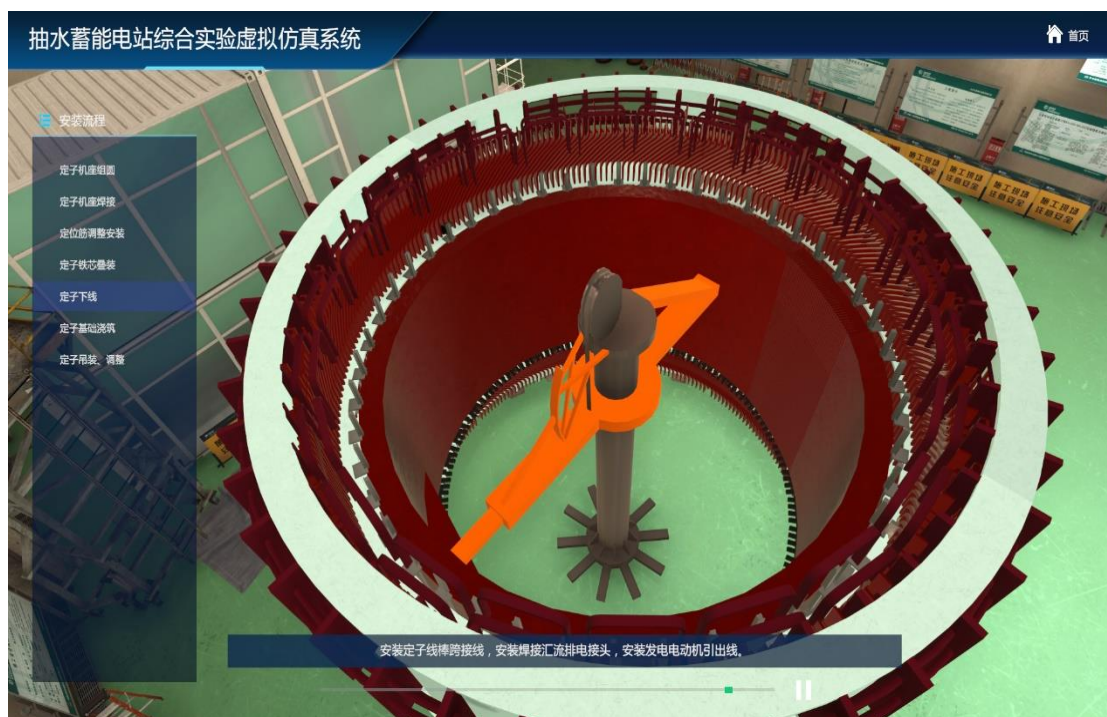




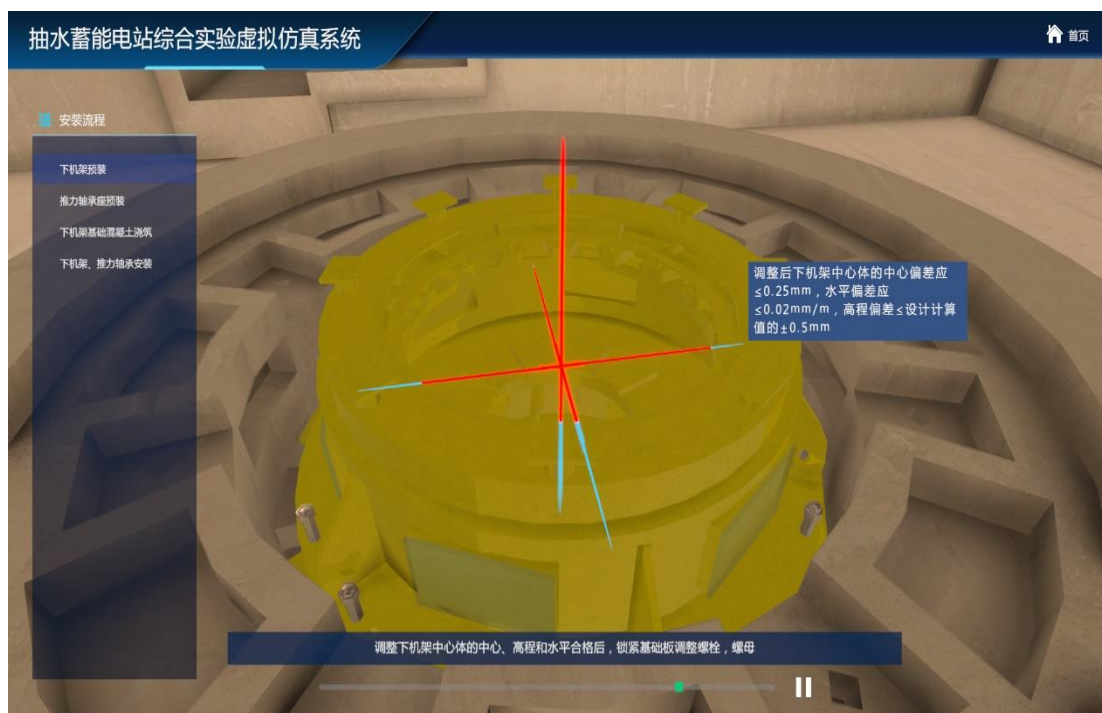
【交互性步骤九】 点击“导水机构安装”，进行导水机构安装工艺环节。



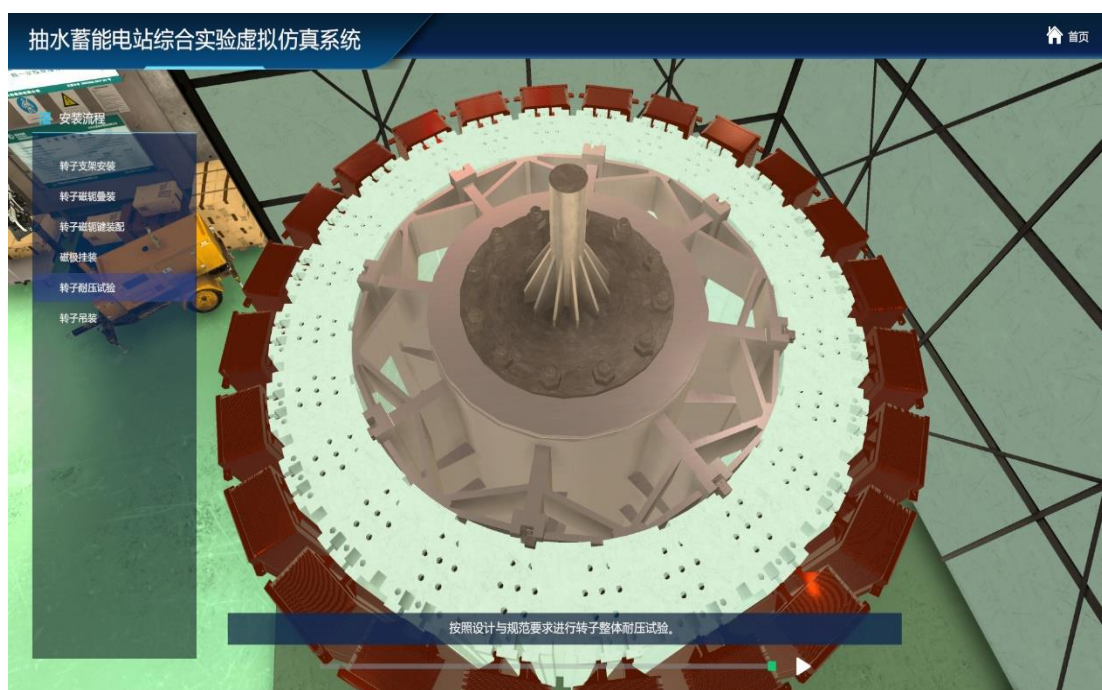
【交互性步骤十】 点击“定子组装及安装”，进行定子组装及安装工艺环节。



【交互性步骤十一】点击“下机架组装及安装”，进行下机架组装及安装工艺环节。

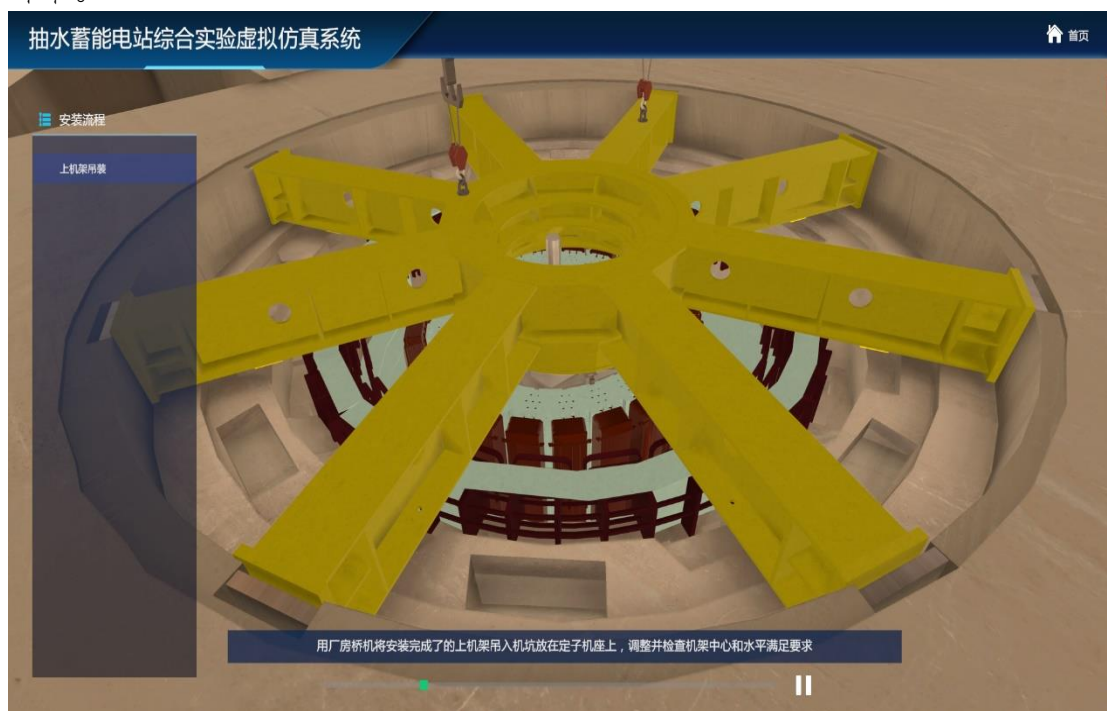


【交互性步骤十三】点击“转子组装及吊装”，进行转子组装及吊装工艺环节。  
转子组装

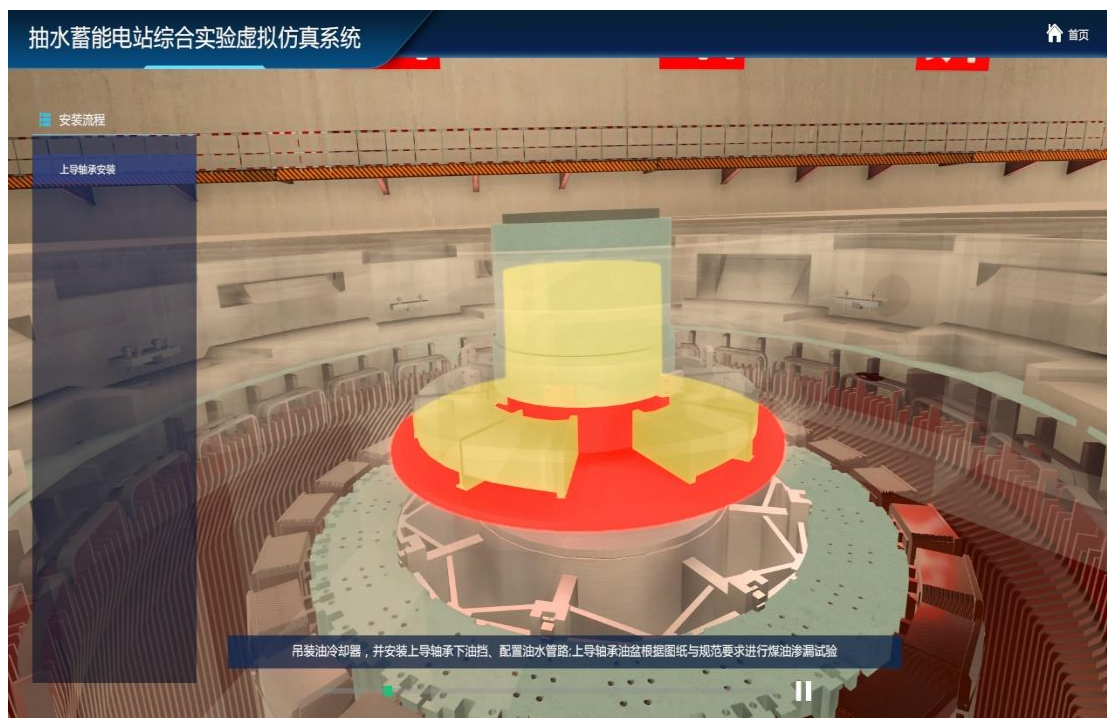




【交互性步骤十四】点击“上机架组装及吊装”，进行上机架组装及吊装工艺环节。



【交互性步骤十五】点击“上导轴承安装”，进行上导轴承安装工艺环节。  
吊装油冷却器，并安装油冷却器挡油板、配置油水管路；上导轴承油盆根据图纸与规范要求进行煤油渗漏试验。



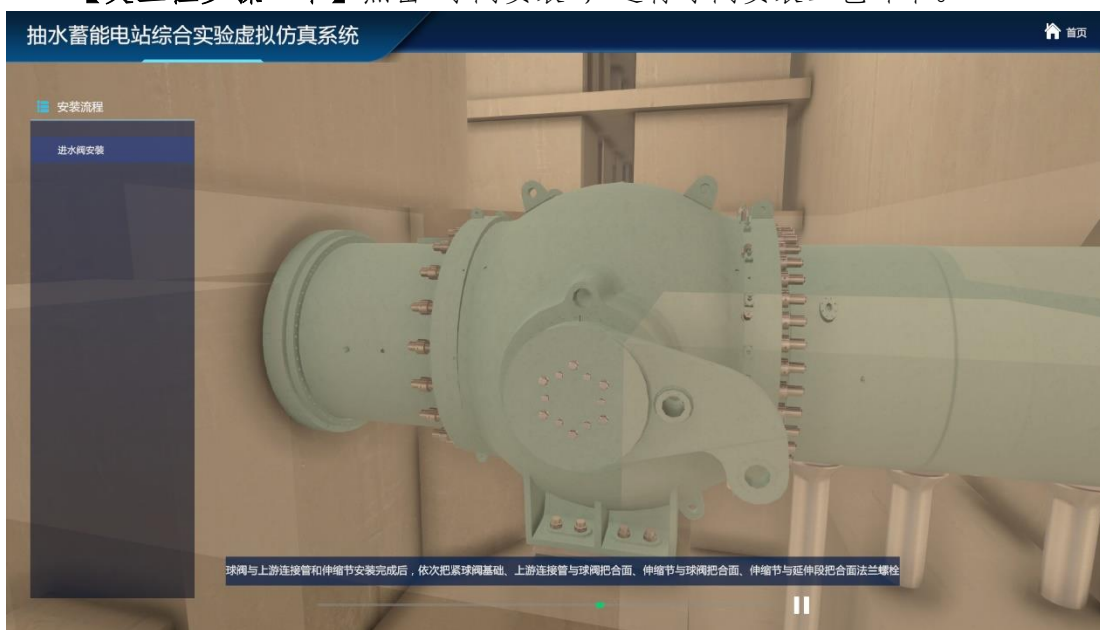
【交互性步骤十六】点击“下导轴承安装”，进行下导轴承安装工艺环节。

【交互性步骤十七】点击“主轴密封及水导轴承安装”，进行主轴密封及水导轴承安装工艺环节。

【交互性步骤十八】点击“水轮机其他附件安装”，进行水轮机其他附件安装工艺环节。

【交互性步骤十九】点击“发电机整体回装”，进行发电机整体回装工艺环节。

【交互性步骤二十】点击“球阀安装”，进行球阀安装工艺环节。



### 实验模块三：抽水至发电工况转换试验

【交互性步骤二十一】点击“抽水转发电流程动作”，进行抽水转发电流程实验环节。

#### 1、实验目的

抽水蓄能电站综合实验虚拟仿真系统

实验原理 实验目的 X

抽水至发电工况转换试验

**实验目的**

抽水蓄能机组从抽水到发电的紧急转换启动控制方法.它在抽水工况关导叶至最小开度到跳开发电机开关GCB后,转轮失去抽水方向的原动力,在导叶不完全关闭的情况下,来自压力钢管的水压将迫使机组制动减速,瞬间经过零转速后立即改变为水轮机转向,并加速到同步转速,并网发电.本发明的有益效果是:没有投入机械制动或电制动使得抽水蓄能机组停止,有效地缩短了工况转换时间;同时,更加有效地体现了抽水蓄能电站在电网发生异常情况时紧急响应,保证电网安全的功能。

开始试验

【交互性步骤二十二】 点击开始试验，进入抽水至发电工况转换试验环节。

抽水蓄能电站综合实验虚拟仿真系统

实验运行状态

1900-1-1 0:00	发电令
2021-3-9 0:03:38: 781	抽水转发电流程动作
2021-3-9 0:03:38: 941	抽水转旋转停机第1步启动
2021-3-9 0:03:38: 941	抽水转旋转停机流程启动
2021-3-9 0:03:39:000	机组流程1 P→旋转停机
2021-3-9 0:03:40:661	导叶拐角位置开关
2021-3-9 0:03:54: 861	流程分GCB
2021-3-9 0:03:54: .717	导叶开度<3%(水泵最小开度)
2021-3-9 0:03:55: 22	励磁远方逆变令
2021-3-9 0:03:55: 22	机组停机开启高顶
2021-3-9 0:03:55: 181	励磁FGR控制方式运行
2021-3-9 0:03:55: 181	高压油顶起交流泵运行
2021-3-9 0:03:55: 882	导叶全关位置
2021-3-9 0:04:03: 540	球阀关闭令
2021-3-9 0:05:12: 343	球阀全关
2021-3-9 0:05:13: 00	机组流程2 旋转停机→停机热备
2021-3-9 0:05:15: 222	励磁电气制动模式令
2021-3-9 0:05:15: 222	电气制动开关远方合闸令
2021-3-9 0:05:19: 223	励磁已投入
2021-3-9 0:08:20: 468	电调调速<5%
2021-3-9 0:08:26: 348	机械制动投入
2021-3-9 0:08:40: 109	停机态
2021-3-9 0:08:41: 0	机组状态停机热备态
2021-3-9 0:08:42: 669	停机热备转空转第3步启动
2021-3-9 0:08:52: 429	机械制动退出
2021-3-9 0:08:53: 469	水轮机工况

【交互性步骤二十三】 实验结束，查看实验结论

#### 实验模块四：甩负荷试验

【交互性步骤二十四】 机组空载运行，向调度申请并网带 25%负荷；

抽水蓄能电站综合实验虚拟仿真系统

压力

蜗壳进口压力 00000

尾水管进口压 00000

球阀前压力 00000

主轴

上导X/Y摆度 00000

下导X/Y摆度 00000

水导X/Y摆度 00000

机组振动

状态 上机架水平与垂直振动 00000

状态 下机架水平与垂直振动 00000

状态 定子机座水平与垂直振动 00000

顶盖水平与垂直振动 00000

监测预警

5 上库水位

10 下库水位

37 机组转速

5 导叶开度

35 实际负荷

运行负荷 25%

1#机组

转速: 3033

功率: 708

效率: 55

导叶开度: 57

异常数量: 9

2#机组

转速: 2166

功率: 926

效率: 77

导叶开度: 29

异常数量: 4

3#机组

转速: 3197

功率: 759

效率: 53

导叶开度: 54

异常数量: 5

4#机组

转速: 4528

功率: 659

效率: 63

导叶开度: 12

异常数量: 9

5#机组

转速: 3787

功率: 765

效率: 76

导叶开度: 41

异常数量: 5

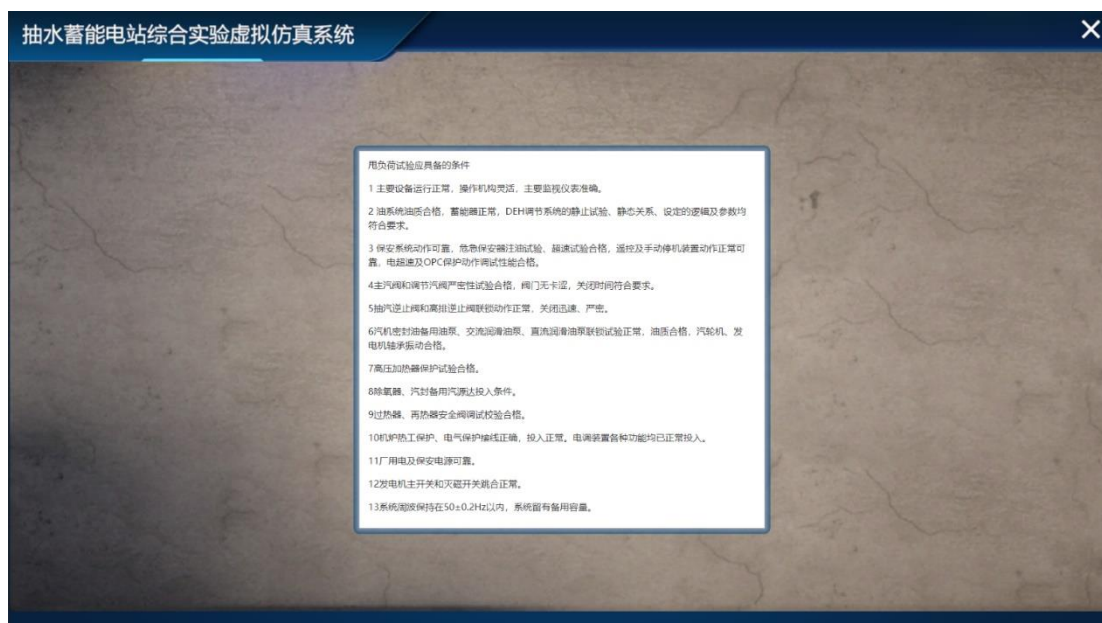


【交互性步骤二十五】调度同意后，1 号机组监控系统自动执行空载—发电流程，机组并网带 25%负荷；

【交互性步骤二十六】观察记录该负荷下的各运行参数；

【交互性步骤二十七】机组在带 25%负荷稳定运行 5~10 分钟；

【交互性步骤二十八】检查监控、调速、励磁、保护各系统功率信号正常；



【交互性步骤二十九】向调度申请甩负荷试验；

【交互性步骤三十】通知各层试验人员、监护人员就位，检查试验录波系统工作正常；

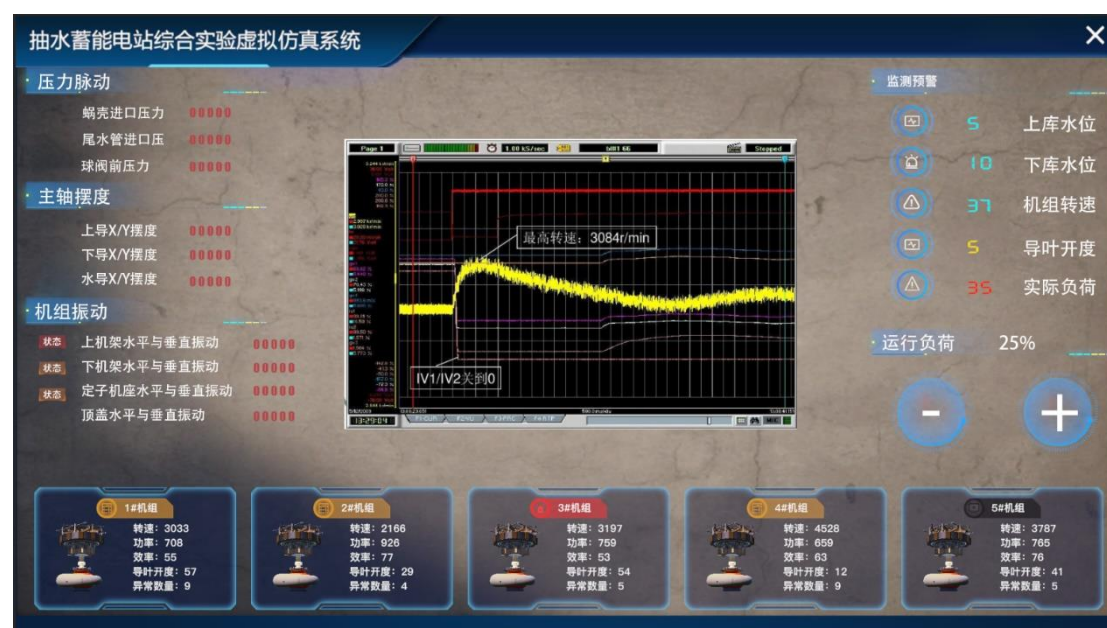


【交互性步骤三十一】调度同意后，在监控系统 LCU1 A1 柜按下 SB3 电气事故停机按钮；



【交互性步骤三十二】观察发电机辅助设备是否工作正常，机组是否达到空载稳态；

【交互性步骤三十三】测录甩负荷过程，机组转速、压力脉动、机组振动与主轴摆度等参数；



【交互性步骤三十四】检查导叶关闭规律是否正常，检查机组转速上升率和压力上升率；

【交互性步骤三十五】待1号机组检查无异常后，按步骤（1）~（11）继续进行机组甩50%、75%、100%负荷试验。

甩负荷试验数据记录：

- (1) 上库水位、下库水位、机组转速、导叶开度、实际负荷；
- (2) 蜗壳进口压力、尾水管进口压力、球阀前压力；
- (3) 机组振动：上机架水平与垂直振动、下机架水平与垂直振动、定子机座水平与垂直振动、顶盖水平与垂直振动；
- (4) 主轴：上导 X/Y 摆度、下导 X/Y 摆度、水导 X/Y 摆度。

### 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）

- (1) 是否记录每步实验结果：是
- (2) 实验结果与结论要求：实验报告，心得体会，分享交流。
- (3) 其他描述：

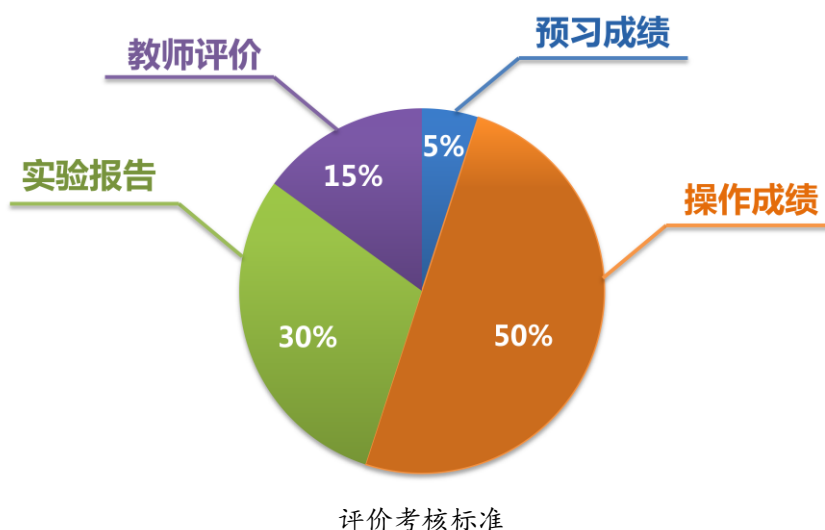
本实验注重实验过程性与挑战性，评价考核体系主要由预习成绩、操作成绩、实验报告及教师评价报告四部分组成，具体如下：

(1) **预习成绩**（占实验考核成绩 5%），包括实验预习报告完成情况、实验前抽查提问回答问题情况。

(2) **操作成绩**（占实验考核成绩 50%），包括实验操作是否清楚、规范，答题环节的答对率，计算数据是否正确，试验结果分析及得出的结论是否正确。

(3) **实验报告**（占实验考核成绩 30%），包括实验报告是否完整，数据分析处理是否正确，实验结果的分析讨论是否合理等。

(4) **教师评价报告**（占实验考核成绩 15%），包括学生实验过程和实验报告中的创新性方面，以及通过团队合作方案整合分析中的表现，进行综合成绩评定。





### 3-8 面向学生要求

#### (1) 专业与年级要求

专业：能源与动力工程

年级：大学三年级——四年级

#### (2) 基本知识和能力要求

要求学生应掌握水轮机，发电机组自动调节，抽水蓄能技术，机组安装与检修等课程的理论知识，具备抽水蓄能电站机组结构、运行、现场测试分析的相关基础知识，并具备虚拟仿真实验平台操作的基本技能。

### 3-9 实验应用及共享情况

(1) 本校上线时间：2020年8月14日（上传系统日志）

(2) 已服务过的学生人数：本校440人，外校60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：2，具体专业：能源与动力工程，水利水电工程

教学周期：秋季学期，学习人数：220人

(4) 是否面向社会提供服务：☒是 ☐否

(5) 社会开放时间：2021年9月3日

(6) 已服务过的社会学习者人数：237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

依照《抽水蓄能技术》的实验课程需要，本着“能实不虚”的原则对抽水蓄能电站综合实验教学课程进行设计。

### （2）教学方法创新

实验教学采用“集中指导+独立完成+合作探索”相结合，以学生独立操作为主。在虚拟仿真实验室、机房或其他场所，由教师集中指导学生进行相应的实验操作，并讲授相关的专业知识；如果学生认为自己初次成绩不理想，或者对某些专业知识由温故而知新的需求，可借助网络利用 PC、VR、手机、平板等终端设备，学生能随时随地完成抽水蓄能电站实验进行仿真实验教学。

水电站可视化实验在能源与动力工程专业的实验教学中的地位非常重要，但是许多高校因条件限制无法在本科阶段开设实体实验，虚拟仿真实验补充了这个缺憾，对本科阶段学生专业素质培养、动手实践能力的提高、面向行业需求等均有重要意义。

抽水蓄能电站作为当前重要的水电工程之一，其低能耗与稳定性受到了越来越重视。但由于抽水蓄能电站机组可视化的实验成本较高（费用100万元以上）、机组安装制作周期长（12个月以上）、实体模型耐久性差（亚克力材料易发黄、漏水和渗水）、安全无法保障（电动机采用工业电380V，实验装置处于有水有电的）试验装置种类繁多，考虑到该类实验在本科教学中不可或缺，因此，目前有条件的高校是采用集中观摩的方式开展实验教学。

西安理工大学拥有**国家级一流专业建设点和国家级教学团队**，开展抽水蓄能电站可视化的虚拟仿真实验项目有利于我校在该课程教学方面处于领跑位置，同时也便于学生独自开展教学实验，培养学生的学习兴趣，激发学习热情和求知欲。

### （3）评价体系创新

评价体系包括操作步骤覆盖考核、线上测评、实验报告三部分的加权组合。

基于所有操作步骤的全覆盖考核，依据教学大纲要求，对部分步骤操作的正

确性、尝试次数等进行评价和记录，结果对学生本人和责任教师可见。

在实验准备和实验结束后设置线上测试、其正确性、答错次数作为评价标准，部分重要问题还会作为下一步仿真实验的入门要求。

考虑到本项目提供抽水蓄能电站工况转换实验、甩负荷试验设计模块，线上实验报告也作为评价方法之一，需要责任教师对学生设计思路和实验效果给出评价，并可与学生进行线上交流。

## 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) 3 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 12 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 30 兆

(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)

阿里云测试 50 人同时在线，响应速度小于 400ms。

### 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

电脑配置最低要求：

Windows7 及以上版本，建议 Windows10。

(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）

无

### 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

电脑配置最低要求：

1.系统：Windows 7 及以上版本。

2.处理器(CPU)：2.8 GHz 或更高级别的处理器。

3.内存：8GB DDR3 或更高配置。

4.硬盘空间：64GB 或更高配置。

5.DX 要求：支持的 DirectX 9。

（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) 证书编号：

达到国家信息安全等级二级认证。

(2) 请附信息系统安全等级保护备案证明

已通过，相关证明正在办理。

### 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		
实验教学	开发技术	<input type="checkbox"/> VR <input type="checkbox"/> AR <input type="checkbox"/> MR <input checked="" type="checkbox"/> 3D 仿真 <input type="checkbox"/> 二维动画 <input type="checkbox"/> HTML5 <input type="checkbox"/> 其他
	开发工具	<input checked="" type="checkbox"/> Unity3D <input checked="" type="checkbox"/> 3D Studio Max <input type="checkbox"/> Maya <input type="checkbox"/> ZBrush <input type="checkbox"/> SketchUp <input checked="" type="checkbox"/> Adobe Flash <input type="checkbox"/> Unreal Development Kit <input type="checkbox"/> Animate CC <input type="checkbox"/> Blender <input type="checkbox"/> Visual Studio <input type="checkbox"/> 其他

	运行环境	<p><b>服务器</b> CPU 2 核、内存 64 GB、磁盘 1024 GB、显存 6 GB、GPU 型号 <u>Intel Xeon Silver 4110</u></p> <p><b>操作系统</b> <input type="checkbox"/>Windows Server <input type="checkbox"/>Linux <input checked="" type="checkbox"/>其他 具体版本：Windows 7 及以上版本</p> <p><b>数据库</b> <input checked="" type="checkbox"/>Mysql <input type="checkbox"/>SQL Server <input type="checkbox"/>Oracle <input type="checkbox"/>其他 <u>RAM 500M 以上 ROM 100M</u></p> <p><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）</p> <p><b>是否支持云渲染：</b> <input type="radio"/>是 <input checked="" 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>采用三维模型构建场景及物体，全方位高度沉浸感的自然环境，简洁优化设计，运行流畅。实验项目景设计与布局参考真实水利枢纽环境并 1:1 还原。</p> <p>场景模型总面数 3000 万、贴图分辨率 1024×1024、每帧渲染次数 60 帧/秒、动作反馈时间 0.02 秒、显示刷新率 24 帧/秒、分辨率 1920×1080。</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

日期	描述
第一年	进一步优化系统功能，提高系统模拟的准确性，强化虚拟仿真实验项目内涵建设。
第二年	与企业合作，研发移动客户端，改善虚拟仿真实验平台的运行环境与交互感受。
第三年	丰富工程案例库，细化甩负荷试验调节模式，融入更多影响因素，依据复杂性设定案例等级，提供更多的选择空间。
第四年	与企业合作，应用 VR 技术开发虚拟系统，提供沉浸式场景体验，进一步提升虚拟仿真实验交互感受。
第五年	增加导叶接力器压力试验、水轮机特性曲线等试验内容丰富抽水蓄能电站综合实验课程体系。

其他描述：

此外，本实验目前只能在 PC 机上运行，用户交互感受的提升尚有较大空间，未来我们将在移动端 APP、VR 应用等方面做进一步的尝试，提升用户的沉浸式感受。

结合人才培养规格和社会对人才智力要求的变化，不断完善线上学习辅导材料和线上考核体系。

加强队伍建设，加强在线教学服务团队和技术支持团队的人才建设，持续完善线上指导教师答疑系统。

依托团队成员科研项目研究成果，不断拓展泵装置结构类型和运行工况条件等，为更多本科专业课程提供虚拟实验学时，更好地为本科教学助力。

### (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	60	1	30
第二年	2	75	1	30
第三年	2	75	1	30
第四年	2	75	1	30
第五年	4	150	1	30

其他描述：

西安理工大学水利水电虚拟仿真实验教学中心是具有扩展性、兼容性、前瞻性的虚拟仿真实验教学管理和共享平台，透过高效管理实验教学资源，已实现校

内外、省及全国范围内的实验教学资源共享，可满足多地区、多学校和多学科专业的虚拟仿真实验教学的需求。本实验已在虚拟仿真实验教学中心对外共享，借助此平台，可免费使用该虚拟仿真实验项目。

该项目已面向高校和社会全面免费开放，并提供教学服务。主要开放对象，一是校内相关专业的学生免费开放使用，包括能源动力工程、水利水电工程等专业的在校本科生，二是向全国高校水利类专业学生免费开放使用，三是知识巩固平台面向社会开发，主要用于中小学生的水利科普。未来五年，将加大推广力度，进一步服务高校能源、水利类学生及社会大众。

## 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	V1.0
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
	<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	全部权利
软件著作登记号	2021SR0497193
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	



## 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）：

2022 年 4 月 15 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（附件1）

2.课程内容学术性评价意见（附件2）

3.运行日志（附件3）