

火电厂 3D 虚拟仿真实训平台

1. 简要介绍

能源与动力工程专业拥有火电厂 3D 虚拟仿真实训平台，该虚拟仿真实训平台以某 $2 \times 1000\text{MW}$ 超超临界大型火电机组为原型，采用三维虚拟仿真技术，实现对火力发电厂生产环境的逼真模拟重现，可以有效的对学生进行热电厂模拟实训，提高学生对热电厂生产环节的认识，为学生学习理论知识、培养节能减排意识，特别是提升对“双碳”战略的认识提供有力的实验实训的支持。该虚拟仿真实训平台安装在实验实训中心 402 机房，该机房尚未连接外网，暂时不能远程共享使用。

该虚拟仿真实训平台功能包括：电厂认知、知识讲解、巡检、主要系统 DCS 操作、主要设备的装配、拓展性试验、文化考核。

1.1 仿真对象应包括下列系统：

(1) 锅炉本体：超超临界变压运行直流锅炉，采用 II 型布置、单炉膛、反向双切圆燃烧方式，炉膛采用内螺纹管垂直上升膜式水冷壁、循环泵启动系统、一次中间再热、调温方式除煤/水比外，还采用烟气出口调节挡板、燃烧器摆动、喷水减温等方式。锅炉采用平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构。

(2) 汽轮机本体：超超临界汽轮发电机组，一次中间再热、单轴、四缸四排汽、双背压、凝汽式、八级回热抽汽。

(3) 发电机本体：三相同步汽轮发电机。

(4) 输煤系统：电厂的输煤系统是从卸煤装置起直至把煤运到锅炉房原煤斗的整个生产工艺流程。电厂输煤系统设备一般包括燃料运输、卸煤机械、受煤装置、煤场设施、输煤设备、煤量计量装置和筛分破碎装置、集中控制和自动化以及其它辅助设备与附属建筑。

(5) 制粉系统：采用中速磨煤机直吹式制粉系统，主要设备包括中速磨煤机、皮带称重式给煤机、离心式密封风机。锅炉风烟系统设计为平衡通风运行，每台锅炉配 2 台动叶可调轴流式送风机、2 台动叶可调轴流式一次风机、2 台静叶可调轴流式引风机。

(6) 烟气脱硫脱硝系统：脱硫系统采用石灰石—石膏湿法烟气脱硫工艺。主要设备包括吸收塔、烟气换热器、增压风机和浆液循环泵。包括吸收塔系统、烟气系统、石膏脱水系统、石灰石制备系统（包括石灰石接收和储存系统、石灰石磨制系统、石灰石供浆系统）、公用系统、排放系统、废水处理系统。脱硝系统采用选择性催化还原技术（SCR），主要包括储氨和供氨设备、稀释风机、氨气/空气混合器、SCR 反应器、吹灰器等。

(7) 除灰、除渣系统：除灰系统主要包括除尘器（静电除尘器或布袋除尘器）、气力输送系统、灰库、仓泵、气化风机、空气电加热器、干灰散装机、湿式搅拌机等。除渣系统的主要设备包括刮板捞渣机、渣仓、溢流水泵、浓缩机等。

(8) 主蒸汽与再热蒸汽系统：主蒸汽系统包括从锅炉过热器出口联箱至汽轮机进口主汽阀的主蒸汽管道、阀门、疏水装置及通往进汽设备的蒸汽支管所组成的系统。再热蒸汽系统包括汽轮机高压缸的排汽返回锅炉再热器再热后送回汽轮机中压缸的蒸汽管道系统。采用二级再热，包括中压缸排汽再热后返回低压缸的蒸汽管道系统。从汽轮机高压缸排汽口到锅炉再热器进口的蒸汽管道；从再热器出口到中压缸蒸汽管道等。

(9) 旁路系统：旁路系统是指锅炉所产生的蒸汽部分或全部绕过汽轮机或再热器，通过减温减压设备（旁路阀）直接排入凝汽器的系统。包括设备为一、二、三级减温器以及高旁阀、低旁阀等。

(10) 回热抽汽系统：机组具有八级非调整抽汽。一段抽汽从高压缸的一段抽汽口抽汽至 #1 高加；二段抽汽从再热蒸汽冷段引出，为 #2 高加供汽；三段抽汽从中压缸三段抽汽口抽出，供给 #3 高加；四段抽汽从中压缸四段抽汽口至抽汽总管，然后再由总管上引出三路，分别供给除氧器、两台给水泵驱动汽轮机和辅助蒸汽系统；五、六、七、八段抽汽分别供汽至四台低压加热器等。

(11) 小汽轮机热力系统：用于驱动给水泵的汽轮机，它利用主汽轮机的中压缸抽气作为气源，低负荷时可以采用新蒸汽或高压缸排气。给水泵采用汽轮机驱动，转速调节性能和传动效率都优于液力联轴器。本系统主要组成为两台小汽轮机。

(12) 辅助蒸汽系统：单元制机组均设置辅助蒸汽系统。辅助蒸汽系统的作用是保证机组安全可靠地启动和停机，及在低负荷和异常工况下提供必要的、参数和数量都符合要求的汽源，同时向有关设备提供生产加热用汽。 辅助蒸汽系统主

要包括：辅助蒸汽联箱、供汽汽源、用汽支管、减温减压装置、疏水装置及其连接管道和阀门等。辅助蒸汽联箱是辅助蒸汽系统的核心部件。

(13)轴封蒸汽系统：轴封系统供汽有主蒸汽、冷再热蒸汽和高压辅汽三路供汽。主蒸汽汽源作为备用汽源，用于在辅助汽源异常时使汽轮机安全停机。轴封供汽采用三阀系统，即在汽轮机所有运行工况下，供汽压力通过三个调节阀即主蒸汽供汽调节阀、辅助汽源供汽调节阀和溢流调节阀来控制，使汽轮机在任何运行工况下均自动保持供汽母管中设定的蒸汽压力。上述三个调节阀及其前截止阀和必需的旁路阀组成三个压力控制站。主要设备为轴封加热器、水封管、轴加风机。

(14)循环冷却水系统：是以水作为冷却介质，并循环使用的一种冷却水系统。主要由冷却设备、水泵和管道组成。冷水流过需要降温的生产设备（常称换热设备，如换热器、冷凝器、反应器）后，温度上升，如果即行排放，冷水只用一次（称直流冷却水系统）。使升温冷水流过冷却设备则水温回降，可用泵送回生产设备再次使用，冷水的用量大大降低，常可节约 95%以上。

(15)抽真空系统：抽真空系统有真空破坏阀、真空泵等组成。

(16)凝结水系统：凝结水系统由凝汽器热井、凝结水泵、轴封加热器、低压加热器、除氧器等组成。

(17)回热加热器的疏水与放气系统：回热加热器的疏水与放气系统是由除氧器、高压加热器、低压加热器、疏水器、轴封加热器组成。

(18)除氧给水系统：除氧给水系统由除氧器、小汽轮机、电动给水泵、前置泵、高压加热器等组成。

(19)汽轮机润滑油系统：润滑油系统采用主油泵—射油器供油方式，其主要任务是向汽轮发电机组的各轴承包括支撑轴承和推力轴承、联轴器及盘车装置提供合格的润滑、冷却油。正常运行时润滑油系统的全部用油由主油泵和注油器供给主油泵的出口压力油先进入主油箱然后经油箱内的油管路分为二路一路进入 1 号注油器，1 号注油器出口油进入主油泵入口，二路进入 2 号注油器，2 号注油器出口也分两路，一路供向保安部套另一路经冷油器送至各径向轴承、推力轴承、联轴器、盘车装置、轴承的低油压保护试验装置用油以及顶轴油入口、密封油系统。

(20)发电厂主接线系统：电气主接线是变电站电气部分的主体、是电力系统中

电能传递通道的重要组成部分之一，变电所的电气主接线是电力系统接线的重要组成部分。它表明变电所内的变压器、各电压等级线路、无功补偿设备最优化的接线方式与电力系统连接，同时也表明在变电所内各种电气设备之间的连接方式。

（21）厂用电系统：厂用电系统是指由机组高、低压厂变和停机/变及其供电网络和厂用负荷组成的系统。供电范围包括主厂房内厂用负荷、输煤系统、脱硫系统、除灰系统、水处理系统、循环水系统等。

1.2 巡检实训仿真应包括下列内容：

（1）锅炉本体检查内容：运行声音、异味、渗漏点、吹灰器、燃烧器等。

（2）汽轮机本体检查内容：运行声音、异味、渗漏点、油箱油位、排烟风机、润滑油压、主油泵入口压力、主油泵出口压力、汽缸绝对膨胀、各轴承回油、各轴承座振动、各轴封压力、各调门开度、各抗燃油滤网压差、盘车控制盘各指示灯等。

（3）发电机检查内容：运行声音、异味、渗漏点、润滑油压、密封油压、氢压、水压、轴承回油、轴承振动等。

（4）变压器检查内容：运行声音、异味、渗漏点、过热点、闪络点、油温、油位、线圈温度、冷却器运行方式与报警信号等。

（5）转动设备检查内容：运行声音、异味、渗漏点、电动机外壳温度、各轴承温度、各轴承振动、各轴承油位、油压与油质、各部冷却水与密封水、入口压力、出口压力、入口温度、出口温度、进口门与出口门状态、油箱（水箱）温度与液位等。

（6）电气设备检查内容：运行声音、异味、有无过热点、有无闪络点、有无放电点、有无异物、电压、电流、油位、温度、湿度、伴热、保护装置信号、保护压板状态、防误闭锁装置等。

（7）除以上检查内容外，对安全设施、安全标志、设备铭牌、设备标识牌、设备控制箱、照明控制箱、电源箱、端子箱、保温、支吊架、孔洞盖板、厂房建筑、文明卫生等内容进行检查。

1.3 知识讲解系统应包括下列内容：

系统原理讲解视频包含如下内容：燃烧系统、风烟系统、发电机冷却系统、脱硫

系统、脱硝系统、EH 油系统、密封油系统、氢冷系统、润滑油系统、抽真空系统、顶轴油系统、轴封系统、闭式水系统。

其中部分系统描述如下：

- (1) 制粉系统：提供制粉系统动画，展示工质在设备及管道内流动的过程及流向。
- (2) 燃烧系统：展示四角切圆燃烧方式，粒子特效动画表现火焰效果与烟气效果。
- (3) 发电机冷却系统：按定子冷却水箱---定子冷却水泵---冷却换热器---机械过滤器---磁性过滤器---发电机定子绕组---定子冷却水箱展示工作流程。
- (4) 抽真空系统：展示抽真空系统凝汽器、真空泵、真空破坏阀等设备；用动画和特效展示系统工作原理；
- (5) 润滑油系统：展示润滑系统主要设备包括主油泵和辅助油泵、冷油器、汽轮机油箱、油烟分离器、注油器、电加热器、切换阀、滤油器、过压阀、止回阀等。
- (6) 闭式水系统：展示闭式水系统主要设备包括闭式水泵、闭式水换热器、膨胀水箱等及几个闭式水用户。

设备原理讲解视频范围包括：炉膛、汽轮机、发电机、空预器、电袋复合除尘器、双进双出磨煤机、中速磨煤机、凝汽器、除氧器、给水泵、板式加热器、管式加热器。

其中部分设备描述如下：

- (1) 炉膛：内螺纹管垂直上升膜式水冷壁、循环泵启动系统、包含省煤器，再热器，过热器等受热面。
- (2) 汽轮机：展示典型汽轮机的详细结构，展示高温高压蒸汽从高压缸到中压缸低压缸，最后进入凝汽器的过程；用颜色的深浅表示温度的高低。
- (3) 空预器：展示典型三分仓空气预热器的结构，换热过程、空预器的转动、烟气与空预器的换热及空预器与一、二次风的换热过程。
- (4) 电袋复合除尘器：展示电袋除尘器的内部结构，烟气的流动过程，电袋除尘器的放电、吸附烟气中灰尘的过程。
- (5) 双进双出磨煤机：展示双进双出磨煤机的基本结构、组成，展示一次风及原煤进入磨煤机动画、原煤研制过程、风粉混合后输出过程。
- (6) 中速磨煤机：展示中速磨煤机的基本结构、组成，一次风及原煤进入磨煤机动画、原煤研制过程、风粉混合后输出过程。

(7) 凝汽器：展示凝汽器的完整结构，排汽进入凝汽器后的相变过程，用颜色变化展示工质温度变化。

(8) 除氧器：展示内部结构、工质的工作过程特效展示。

(9) 板式加热器：展示逆流式板式加热器的结构、冷热流体在加热器中的流动传热过程，用颜色深浅展示温度的变化过程。

(10) 管式加热器：展示管式加热器的结构、工质在管侧和壳侧的流动及凝结过程。

2 火电厂 3D 虚拟巡检仿真实训平台技术要求

2.技术要求

仿真系统应以 $2 \times 1000\text{MW}$ 超超临界大型火电机组为原型对锅炉、汽机、发电机及电气系统仿真，根据设计院设备资料、厂区图纸、热力系统图、运行数据采集表等进行三维模型搭建。现场演示的三维场景、设备布局 and 现场提供的设计院资料需一致，系统和设备的位置、尺寸等与实际现场保持一致，设备零部件外观与现场一致。

2.1 系统性能要求

模型搭建应采用虚拟现实 360 度高仿真人机交互技术进行开发，贴图分辨率不低于 2048×2048 ，软件采用 GPU 实时渲染技术，全屏模式，对目标使用电脑无任何分辨率要求和限制，软件运行时的平均 FPS 不低于 50。

2.2 底层支撑环境要求

卖方需提供专业的实时仿真引擎作为底层支撑，负责数学模型软件的实时解算，包括仿真时钟管理功能、实时数据库功能、仿真模型调度功能、工况管理功能，并且提供和二维、三维图形软件以及其它第三方软件进行数据交互的接口，为上层应用软件提供协同运行支持。

2.3 模拟精度要求

仿真机数学模型应严格遵循能量守恒定律、质量守恒定律、动量守恒定律以及传热学原理。主要系统和被仿真设备按质量、能量和动量转换定律严格推导。传热和摩擦损失的计算表达式严格地从公认的工程关系式导出，符合传热机理和流动特性。流体物理特性由公式或查表方式计算，其精确度应能满足仿真全工况过程的稳态精度要求。采用分布参数建立数学模型。

2.4 交互方式要求

本软件为 PC 版

3 火电厂 3D 虚拟巡检仿真实训平台产品功能要求

3.1 火电厂认识实习

(1) 火电厂全景漫游：可实现在仿真范围内的全厂漫游功能，通过漫游了解电厂的建筑布局、主要设备、生产工艺等，对火电厂全貌建立感性认识。

(2) 人称形式与角色区分：火电厂 3D 虚拟巡检仿真实训平台包括基于三维场景的虚拟人展示。包括值长、单元长、主值、副值、巡检等角色；安全工具的选择和使用事项可通过视频学习；巡检线路可以选择。

要求卖方现场演示能够体现本条技术要求的产品。

(3) 进厂岗位学习：部门职责、岗位设置和岗位任职要求学习，虚拟人走到电厂相应的部门参观，由主值带领并讲解部门职责和岗位任职要求的文字描述。

(4) 设备和系统学习：点击相关设备或系统显示出其简介、图片及工作原理及相关操作规程文字界面、操作规范等，同时留出编辑接口，方便使用过程中更新素材。

(5) 安全教育：厂区内设置危险标志牌及护栏，人员靠近时会有危险区域声光报警提示。注重培养学生的安全意识及按流程规范操作的意识。

(6) 软件应具备认识实习路线编辑与记录功能，并且提供编辑接口，方便老师建立认识路线学生来学习，同时路线可以语音文字图片说明等。

(7) 软件应具有搜索定位功能，并且提供重要设备或系统列表。

3.2 知识讲解功能要求

以 1000MW 等级超超临界大型火电机组为原型，对典型系统设备制作原理视频，包括以下要求内容：

(1) 用特效方式展现内部工质流向。

(2) 对系统的功能、组成和原理有声音和文字同步介绍。

3.3 火电厂巡检实训

巡检的各组成部分的热力过程具有一个完整工况的数学模型。三维场景中的温度、

压力等仪表中的参数能正确显示出其动态变化过程，并应符合电厂设备运行参数标准。

巡检过程与底层数据关联，在本项目中，将巡检功能与 DCS 数据的深度融合。

(1)在巡检过程中观察到的数据与底层数据关联。

(2)巡检过程看到的事故现象与底层数据关联。

(3)巡检过程做的操作影响底层数据的计算。

(4)巡检过程扩充部分与集控室（DCS）操作人员配合操作的功能。

巡检的各组成部分的设备严格按照电厂的位置和设备连接来布置，巡检操作所使用的工具应与电厂生产运行过程相匹配，巡检的执行标准应符合电厂设备运行参数标准。

本功能模块应提供教学模式、练习模式、考试模式三种实训功能。

3.3.1 教学模式

此模式应包含巡检制度学习、巡检工具介绍、巡检路线选择等内容，宜采用固定路径模式进行教学，自动播放巡检过程，不需要用户进行操作。

3.3.2 练习模式

练习模式应包含巡检工具的选择、巡检路线的选择、填写巡检记录、事故辨识和操作等内容。

在此模式下，用户手动操控行进方向，可以自行选择巡检路径。在行进过程中，对于经过的设备，仿真平台应提供记录表进行数据记录。仿真平台应配合给出事故工况和事故相关任务，可以依次练习每个设备出现事故时的数据现象和处理方法。巡检员在按照巡检路径行进时，观察数据和设备现象，发现问题时，进行汇报或者根据要求，自行处理事故。包含事故的设备，系统应给出高亮提示，并且提示操作方法。当使用者来到设备前时，对应的操作步骤会有操作提示和文字介绍。

3.3.3 巡检考核模式

考核模式下，用户手动操控行进方向，可以自行选择巡检路径。

考核模式下，没有巡检路径提示、操作提示、故障提示等。

仿真平台配合给出事故工况和事故相关任务。

考核评分系统能够动态获取用户的操作数据，并根据当前机理模型系统状态和评

定逻辑，给出操作成绩和得分情况。

3.4 火电厂主要系统的操作

本项目是火电厂三维仿真实训平台建设项目，利用计算机仿真技术模拟系统和设备的运行操作，并能经过特殊设计的同步技术融和贯通为一个整体，最终完成三维电站+DCS 数值模拟。我公司基于图形化建模的仿真引擎 AlgDesigner、TeachingLab，支持机理模型的仿真模型开发。数学模型方程遵循能量、质量和动量守恒定律。主要系统和被仿真设备按质量、能量和动量转换定律严格推导。传热和摩擦损失的计算表达式严格地从公认的工程关系式导出，符合传热机理和流动特性。流体物理特性由公式或查表方式计算，其精确度满足仿真全工况过程的稳态精度要求。

六大系统 DCS 操作：展现燃烧系统、制粉系统、高压加热系统、低压加热系统、凝结水系统、除氧给水系统的 DCS 操作。

3.5 动力设备虚拟拆装

采用三维虚拟仿真技术，实现对电站相关设备的拆解和安装。通过预先给定的设备，学生根据以前所学习的理论知识和对系统的认识，要求独立地完成电厂某些主要系统的装配，强化学生对电厂主要系统的认识和理解，同时提高学生的动手能力。对每个零部件有相应的介绍功能。具有学习、练习、考试三种模式。

1)功能描述

此系统应具备如下功能：

- (1)提供学习、练习、考试三种模式。
- (2)能够介绍设备的功能。
- (3)学习模式下，以步骤动画的形式，显示每一步的装配动画，可以顺序播放，也可以选择任意步骤。
- (4)练习模式下，以文字和高亮的形式，智能提示下一步需要安装的零件名称，并且对目标位置进行高亮显示，提示正确的安装位置。用户也可以不按照正确顺序装配，但是当步骤不符合步骤树的正确逻辑时，会弹出错误提示。
- (5)考试模式下，软件不再提示下一步安装的步骤，而是和评价系统相连接，用户

的装配顺序如果发生错误，将在评价系统中予以扣分。

(6)只要符合装配关系要求的零件，用户均可进行安装操作，包括基本零件和装配在一起的零件组合，在考试模式下不能出现由于软件本身技术问题导致的安装顺序的隐性提示。

(7)设备零件的装配关系要求在配置文件中可以自定义，一对一、一对多、多对一的关系。如果用户对装配顺序不满意，可以通过修改配置文件控制设备的装配顺序，而不需要修改软件本身。

(8)要求软件提供智能辅助装配动作的功能，鼠标拖动某种零件（或零件组合），接近某一个可装配零件附近时，智能吸附到预装配位置，零件（或零件组合）和被装配体均只能进行共轴或者共面的约束运动。处于约束运动状态下的零件（或零件组合）高亮显示，以区别于其它能够自由运动的物体。拖动其它零件（或零件组合），不能和当前正在准备装配的零件（或零件组合）进行装配。拖动处于预装配状态的装配零件（或零件组合）和被装配零件（或零件组合），均可以完成装配。

(9)设备安装的过程提供零件智能旋转对准功能，不需要用户手工旋转。

(10)拆装场景采用三维虚拟现实技术实时渲染，装配过程中可实现场景内 360 度旋转。

2) 拆装评分

(1)提供自动评价功能，对学生的操作步骤自动评估，自动打分，并实时保存为快门文件。

(2)提供操作步骤的自动记录功能，学员的装配路径能够实时被保存成为快门文件。

3) 范围

包括：汽轮机、除氧器、凝汽器、除尘器、燃烧器。

3.6 拓展实验

提供的对象为 1000MW 超超临界锅炉燃烧系统虚拟仿真（需包含部分电站仿真数学模型），后台以数学仿真计算模型支撑。

做燃烧调整实验，可进行燃烧器摆角调整、空气量调节、积灰处理等操作。底层燃烧数学模型应遵循能量守恒定律，火焰的摆角、燃烧状态、炉膛积灰状态随底层数据变化。其中实验特效动画与数据是相关联动的，并且重要数据有实时曲线展示。具有实验时有可实现数据的表格录入功能，实验后观察记录数据的曲线自动生成功能。

3.7 能源方向文化课考试系统

提供文化课考试系统检测学生基础知识掌握情况，试题应包括安全、汽机、锅炉、电气等方面知识。从一定量题库中抽取一部分试题来对学生进行考核，并且提供修改题库的接口。