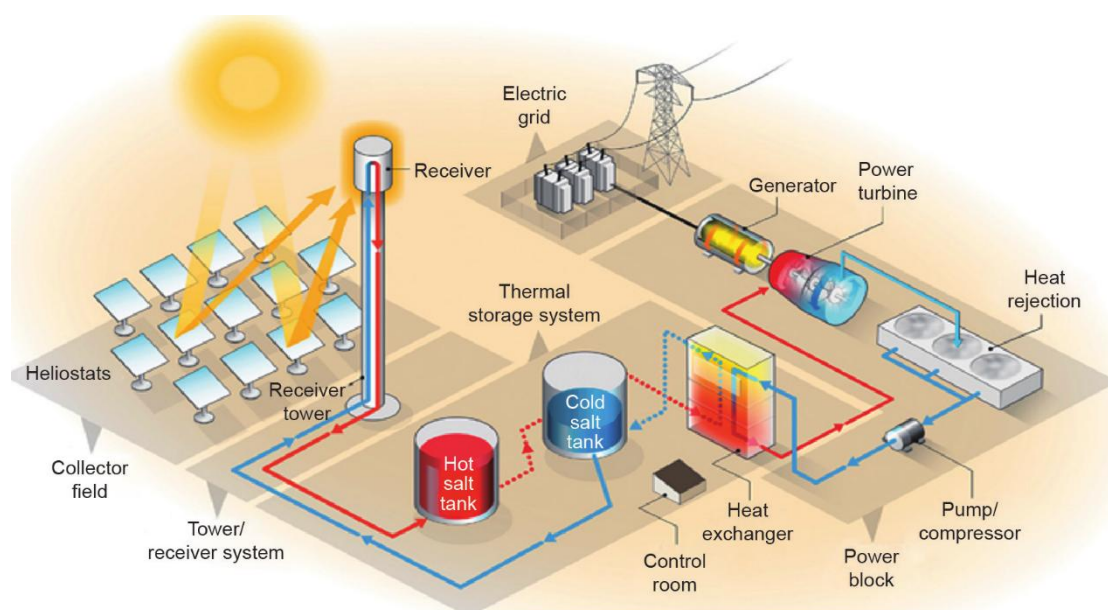


塔式太阳能热发电与储能虚拟 仿真实验指导书

李晓庆, 马玉龙, 高广涛 编



2022-7-25

电子信息工程学院 新能源科学与工程

目录

1	实验构架	1
2	实验流程	2
3	交互性步骤详细说明	2
3.1	环节一：塔式太阳能热电站基本组成认知	2
3.1.1	步骤 1：塔式太阳能热电站系统构成认知（视频学习）	3
3.1.2	步骤 2：聚光子系统组成和功能认知（点击观察）	6
3.1.3	步骤 3：集热子系统组成和功能认知（点击观察）	8
3.1.4	步骤 4：储热子系统组成和功能认知（点击观察）	9
3.1.5	步骤 5：换热子系统组成和功能认知（点击观察）	12
3.1.6	步骤 6：发电子系统组成和功能认知（点击观察）	14
3.2	环节二：太阳能热电站设计集成	16
3.2.1	步骤 7：塔式太阳能光热电站初步选址（图文学习+方案选择）	16
3.2.2	步骤 8：吸收器额定热输出功率测算（数据采集+设计计算）	20
3.2.3	步骤 9：吸收塔高度设计（设计计算）	21
3.2.4	步骤 10：法向直接辐照度测定（虚拟测量）	21
3.2.5	步骤 11：定日镜场总面积估算（设计计算）	22
3.2.6	步骤 12：定日镜型号选择及数量计算（方案选择+设计计算）	23
3.2.7	步骤 13：定日镜场辐射交错排列布置（设计计算）	24
3.3	环节三：储热系统匹配与优化	25
3.3.1	步骤 14：镜场余弦效率比较（图文学习）	25
3.3.2	步骤 15：镜场效率计算及最终选址（方案比较）	27
3.3.3	步骤 16：储热系统优化设计（图文学习+优化探究）	28
3.3.4	步骤 17：熔盐罐液位测量与储热容量评估（虚拟测量+计算）	28
3.3.5	步骤 18：最大储热量计算（计算评价）	29

1 实验构架

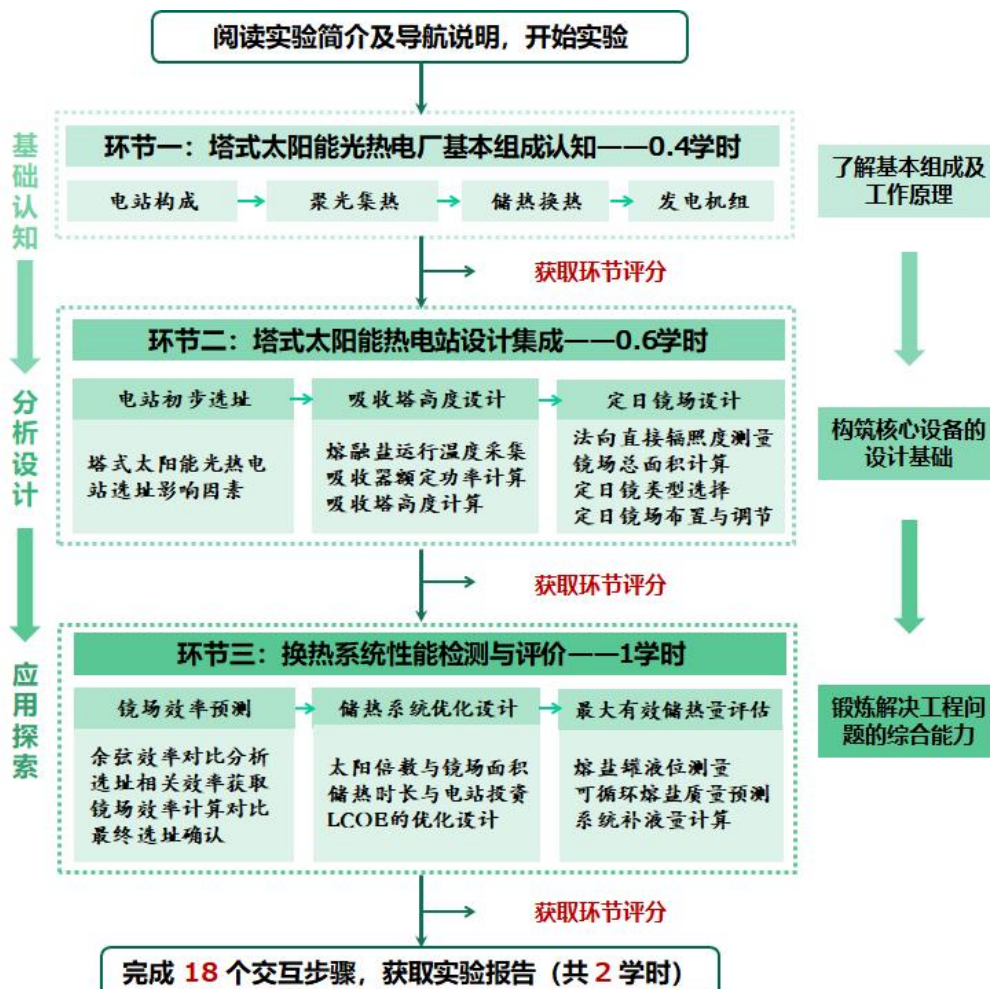


图1 塔式太阳能热发电与储能虚拟仿真实验总体设计原理图

2 实验流程

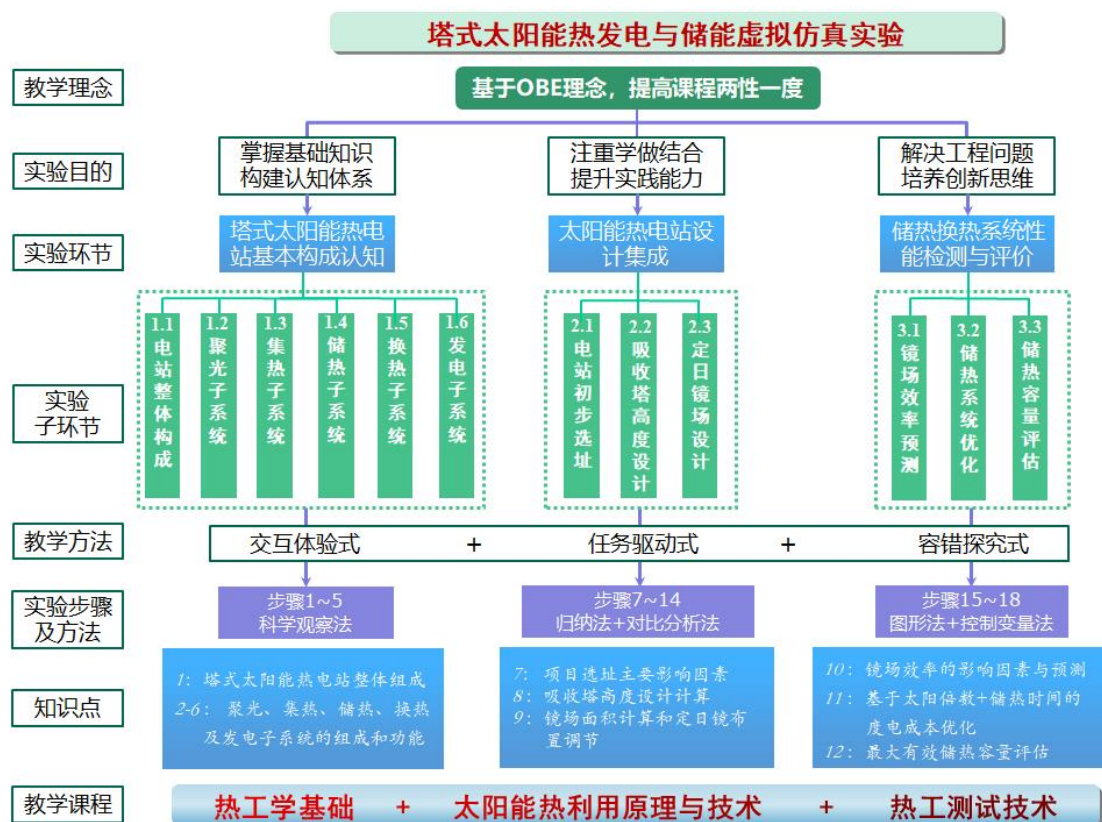


图2 塔式太阳能热发电与储能虚拟仿真实验设计及流程图

3 交互性步骤详细说明

在本实验的三个环节中，需要完成**视频学习、点击观察、图文学习、方案选择、设计计算、虚拟测量、虚拟调节、数据采集、优化探究及计算评价**等10余种单项及组合操作。具体步骤如下：

3.1 环节一：塔式太阳能热电站基本组成认知

本环节包含电站总体构成、聚光子系统、集热子系统、储热子系统和换热子系统、发电子系统，共6个子环节，对应交互步骤1~6，旨在帮助学生通过对观察完成对塔式太阳能热电站整体构成和几个重要子系统的认知，掌握系统基本组成和工作原理，完成“基础认知”层面的训练。

3.1.1 步骤 1：塔式太阳能热电站系统构成认知（视频学习）

掌握塔式太阳能光热电站的主要系统构成：从平台登录进入软件欢迎页面（图 3），点击“确定”按钮，自动进入环节一。软件自动进入巡航动画，系统将以导航模式引导参观塔式太阳能光热电站的整体机构及主要设备（如非首次做实验，可选择跳过此动画）。动画结束，自动进入塔式太阳能光热电站系统组成导航页面。



图 3a 实验开始界面

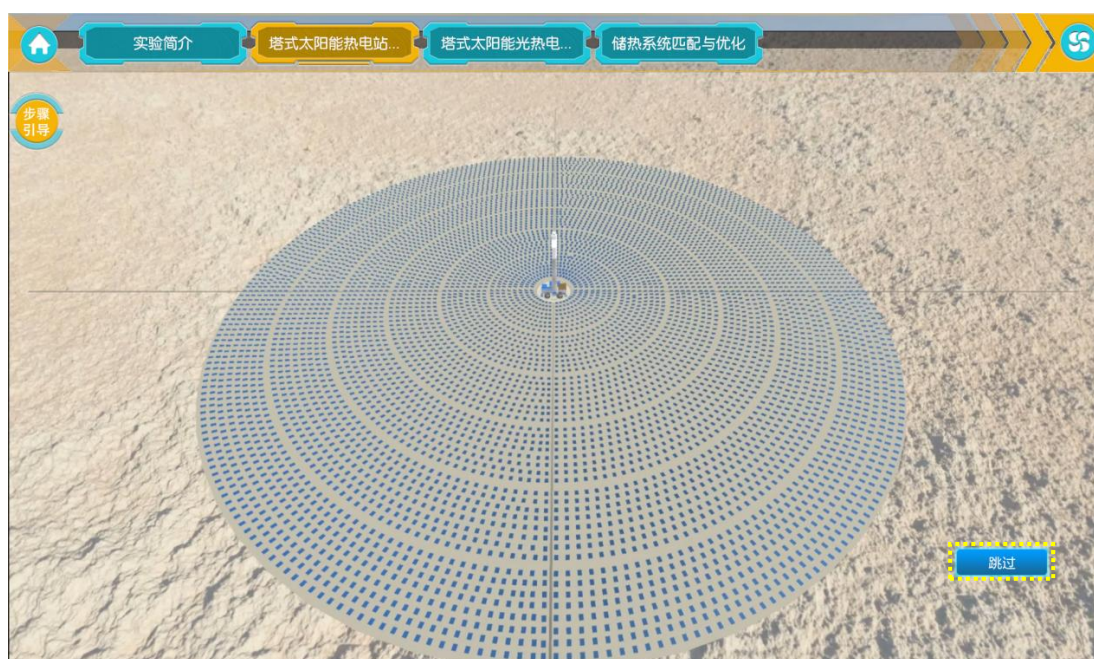


图 3b 电站巡航动画——鸟瞰图



图 3c 电站巡航动画——定日镜



图 3d 电站巡航动画——吸收塔



图 3e 电站巡航动画——储热罐



图 3f 电站巡航动画——换热器



图 3g 塔式太阳能光热电站系统组成导航页面

3.1.2 步骤 2：聚光子系统组成和功能认知（点击观察）

掌握聚光子系统构成：根据塔式太阳能光热电站系统组成导航页面标签提示（鼠标滑过标签时，会有子系统简介），点击聚光子系统（图 4a）。进入聚光子系统页面（图 4b），观察右下方系统图对应位置，观察页面左下方定日镜镜面外形及结构组成，点击“结构观察”（图 4b），定日镜开始旋转，可 360°全方位观察定日镜结构（图 4c），并通过阅读页面上方文字，了解镜场基本组成单元定日镜的结构组成与工作原理。学习结束，点击页面左上角“箭头”，返回塔式太阳能光热电站系统组成导航页面。

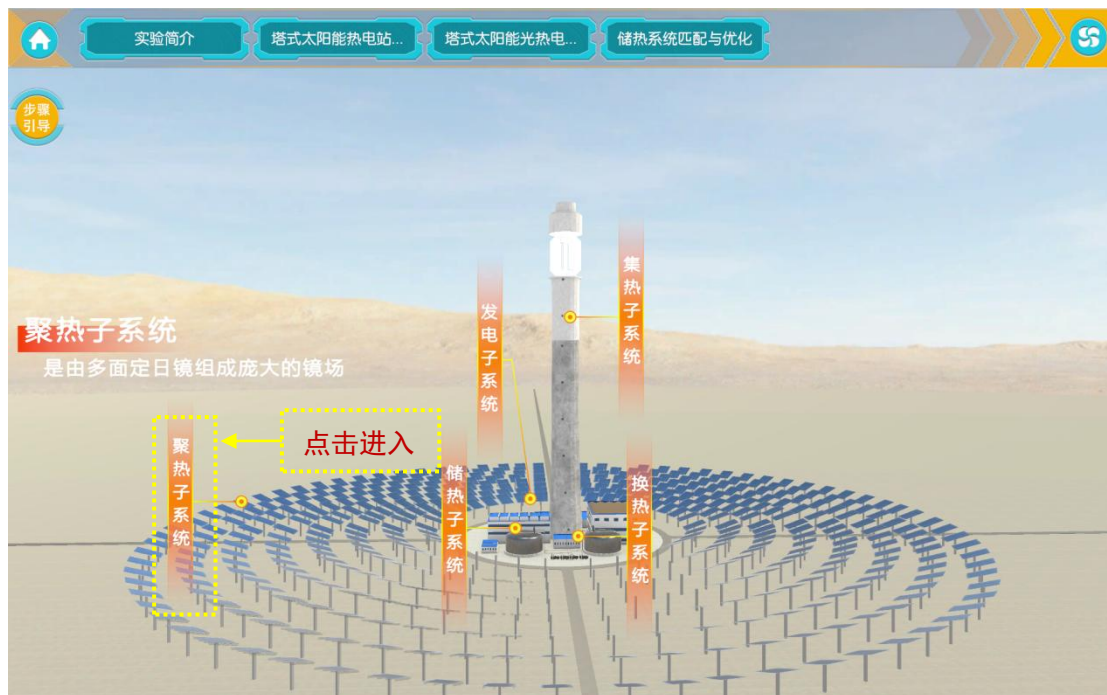


图 4a 塔式太阳能光热电站系统组成导航页面——聚光子系统

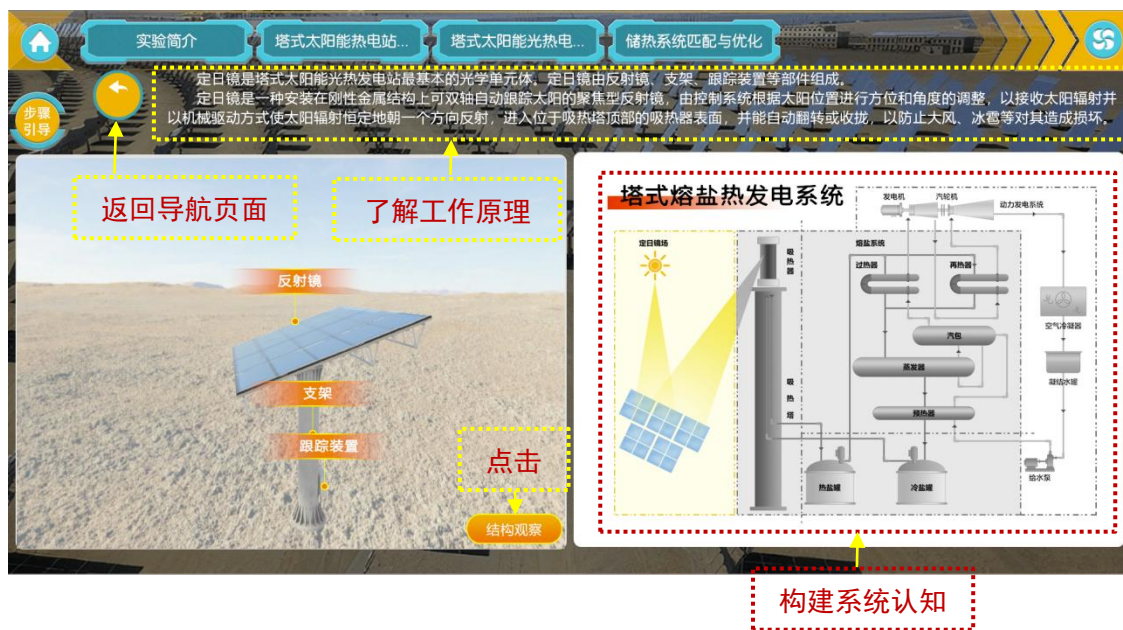


图 4b 聚光子系统组成和功能认知——定日镜镜面

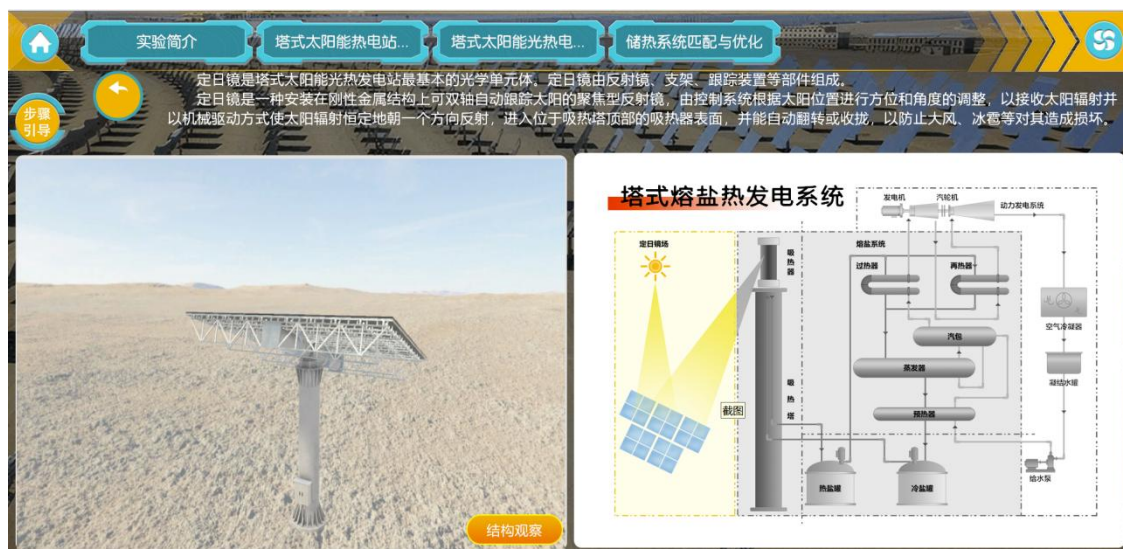


图 4c 聚光子系统组成和功能认知——定日镜结构

3.1.3 步骤 3：集热子系统组成和功能认知（点击观察）

掌握集热子系统构成：点击集热子系统（图 5a）。进入集热子系统页面（图 5b），观察右下方系统图对应位置，观察页面左下方吸收塔及吸收器外形，点击“结构观察”（图 5b），吸收塔开始旋转，吸收器由运行时的炫光状态变为停运时的哑光状态，可 360°全方位观察吸收塔及塔顶吸收器结构，并通过阅读页面上方文字，了解集热子系统基本组成与工作原理。学习结束，点击页面左上角“箭头”，返回塔式太阳能光热电站系统组成导航页面。

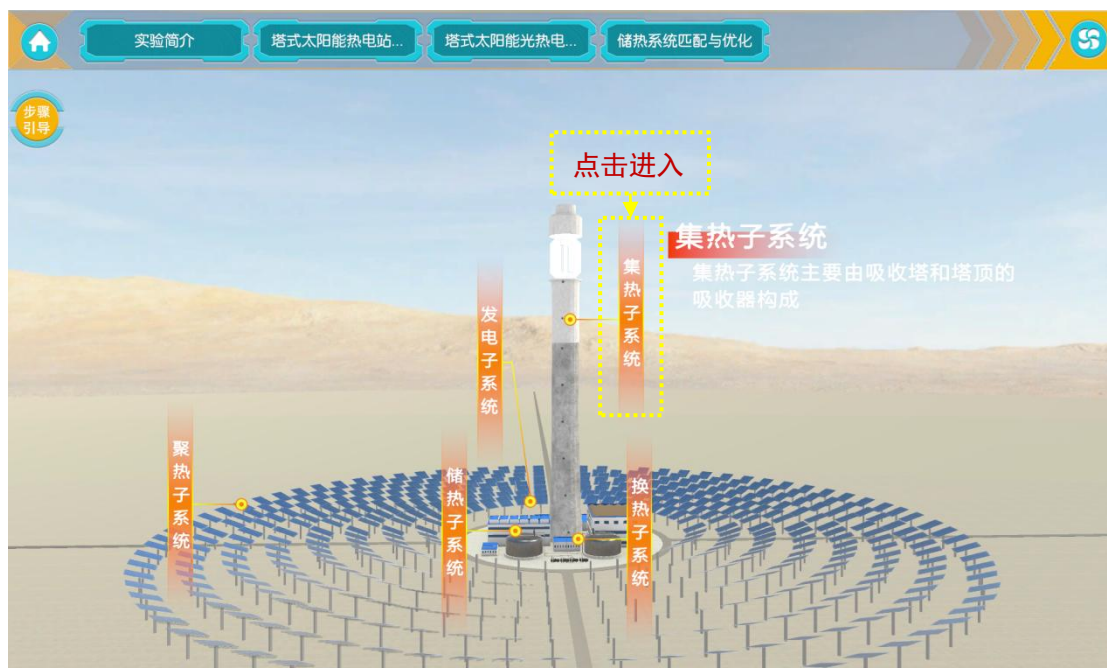


图 5a 塔式太阳能光热电站系统组成导航页面——集热子系统

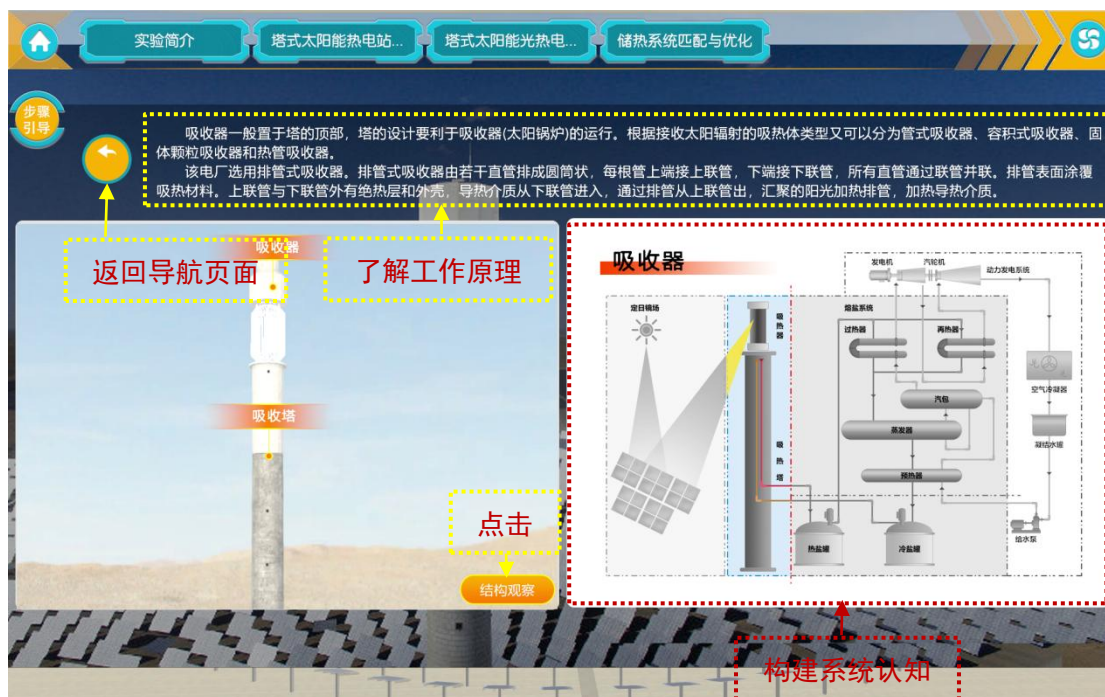


图 5b 集热子系统组成和功能认知——集热器结构

3.1.4 步骤 4：储热子系统组成和功能认知（点击观察）

掌握储热子系统构成：点击储热子系统（图 6a）。进入集热子系统页面（图 6b），观察右下方系统图对应位置，分别点击“热罐”、“冷罐”和“熔盐泵”按钮，可观察页面左下方冷罐、热罐及熔盐泵的外形（图 6b~图 6d），在左下方不同设备对应的外观图右下角分别点击“结构观察”（图 6b~图 6d），设备开始旋转，可 360°全方位观察其外观结构，同时对热罐和冷罐进行了全剖处理，可以观察罐体多层壁面组成（图 6e、图 6f），并通过阅读页面上方文字，了解储热子系统基本组成及各核心设备工作原理。学习结束，点击页面左上角“箭头”，返回塔式太阳能光热电站系统组成导航页面。

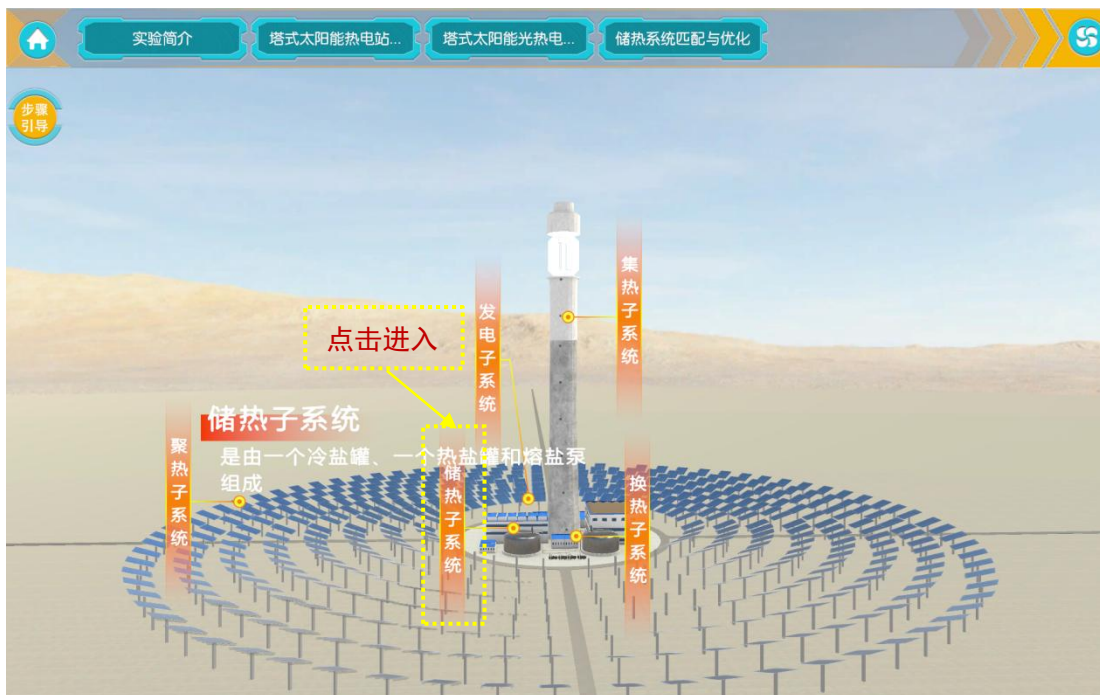


图 6a 塔式太阳能光热电站系统组成导航页面——储热子系统



图 6b 塔式太阳能光热电站储热子系统——热罐外观

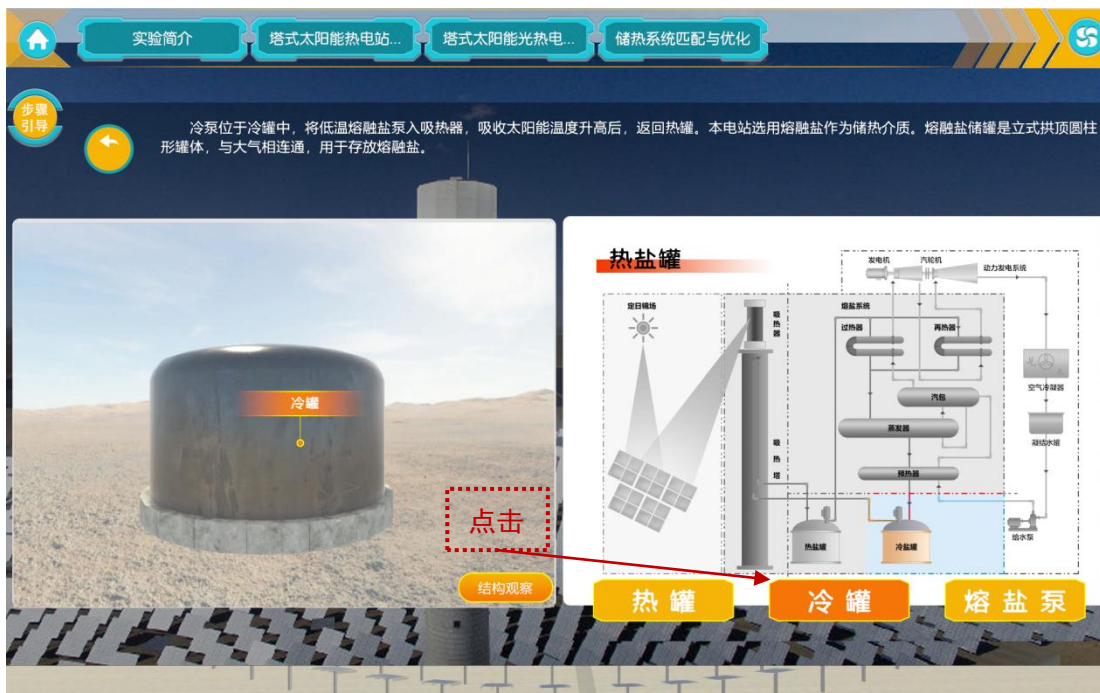


图 6c 塔式太阳能光热电站储热子系统——冷罐外观



图 6d 塔式太阳能光热电站储热子系统——熔盐泵外观



图 6e 塔式太阳能光热电站储热子系统——热罐剖面结构

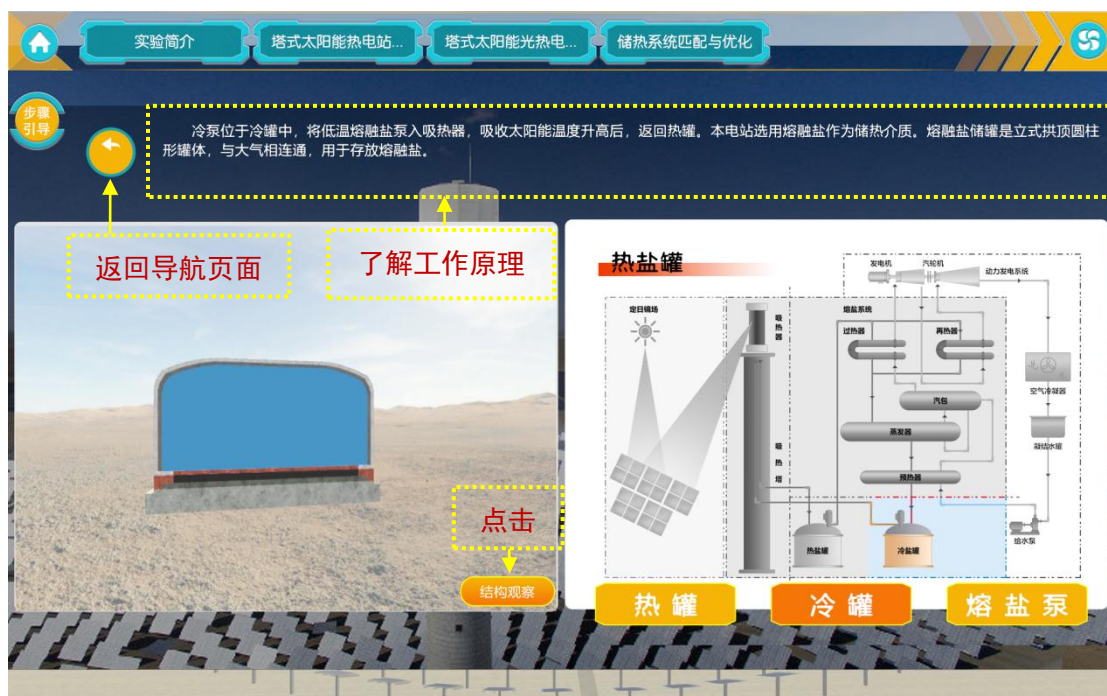


图 6f 塔式太阳能光热电站储热子系统——冷罐剖面结构

3.1.5 步骤 5：换热子系统组成和功能认知（点击观察）

掌握换热子系统构成： 点击换热子系统（图 7a）。进入换热子系统页面（图 7b），观察右下方系统图对应位置，观察页面左下方换热器外形，点击“结构观察”（图 7b），换热器开始旋转，可 360°全方位观察管壳式换热器内部结构（图

7c)，并通过阅读页面上方文字，了解换热子系统基本组成与工作原理。学习结束，点击页面左上角“箭头”，返回塔式太阳能光热电站系统组成导航页面。

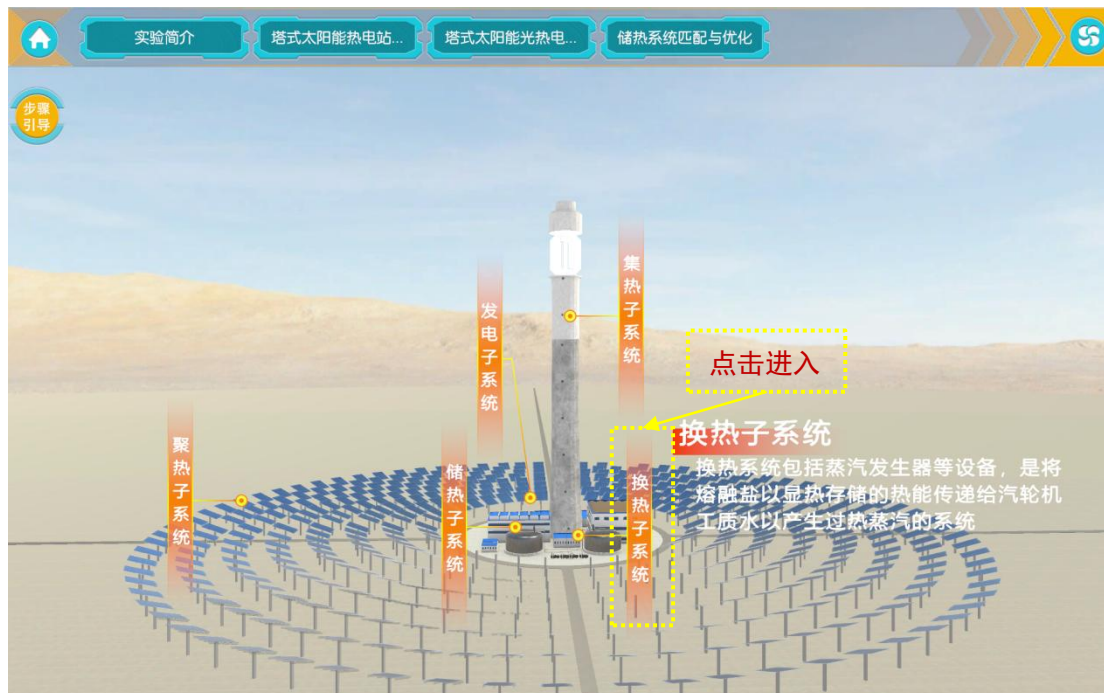


图 7a 塔式太阳能光热电站系统组成导航页面——换热子系统



图 7b 塔式太阳能光热电站换热子系统——换热器外观



图 7c 塔式太阳能光热电站换热子系统——换热器内部结构

3.1.6 步骤 6：发电子系统组成和功能认知（点击观察）

掌握发电子系统构成：点击发电子系统（图 8a）。进入发电子系统页面（图 8b），观察右下方系统图对应位置，观察页面左下方发电机组外形，点击“结构观察”（图 8b），换热器开始旋转，可 360°全方位观察发电机组的汽轮机和发电机结构（图 8c），并通过阅读页面上方文字，了解发电子系统基本组成与工作原理。学习结束，点击页面左上角“箭头”，返回塔式太阳能光热电站系统组成导航页面。

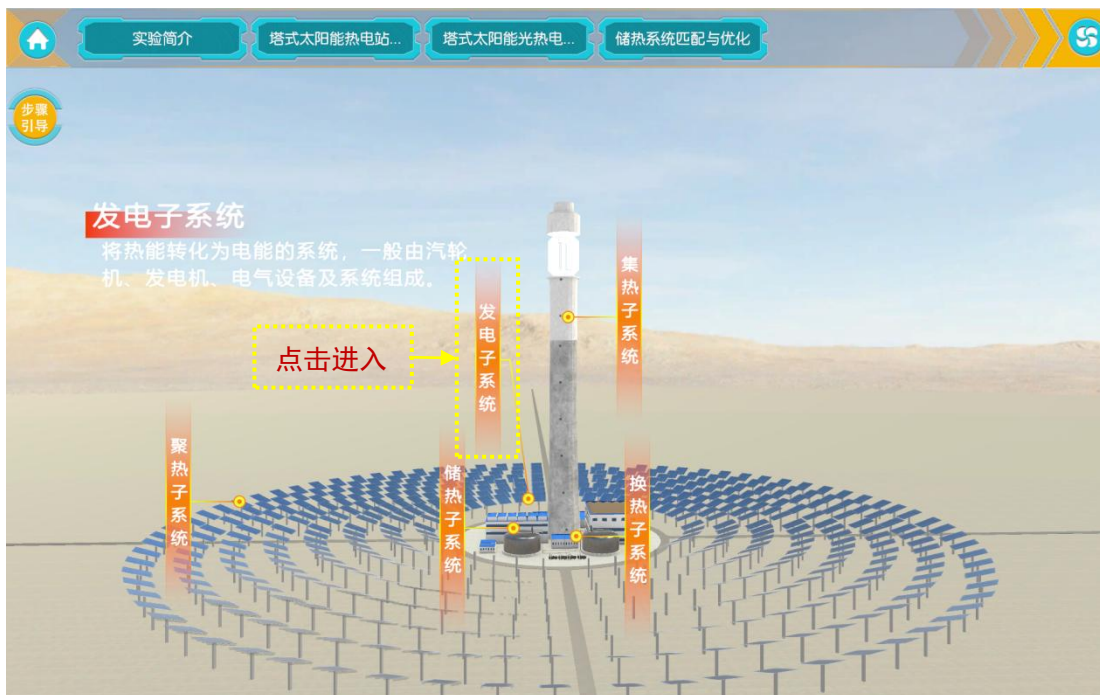


图 8a 塔式太阳能光热电站系统组成导航页面——发电子系统

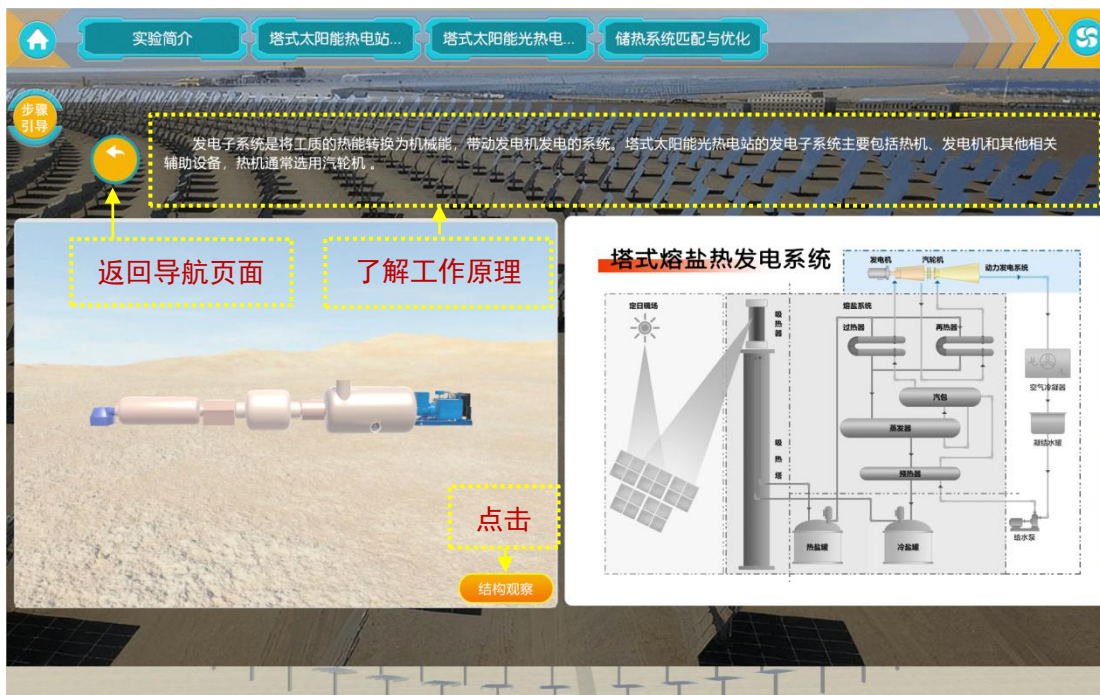


图 8b 塔式太阳能光热电站发电子系统——发电机组外观

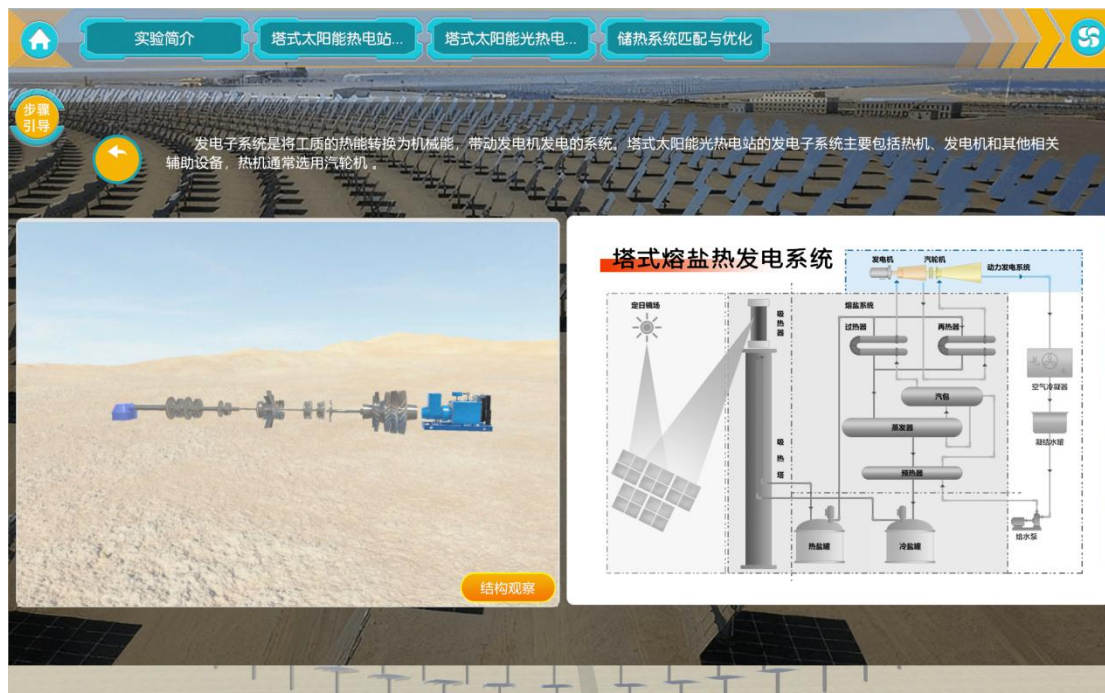


图 8c 塔式太阳能光热电站发电子系统——发电机组内部结构

3.2 环节二：太阳能热电站设计集成

本环节包含电站初步选址、吸收塔高度设计、定日镜场设计，共 3 个子环节，对应交互步骤 7~14，旨在帮助学生通过对塔式太阳能光热电站主要设备的分析计算，掌握设计的基本依据及步骤，完成“分析设计”层面的训练。具体步骤如下：

3.2.1 步骤 7：塔式太阳能光热电站初步选址（图文学习+方案选择）

掌握影响塔式太阳能光热电站选址的主要因素：点击对话框完成设计任务确认（图 9a），点击进入初步选址页面，阅读上方文字介绍，依次点击“下一项”（图 9b~9f），了解在电站选址时需要考虑的主要因素，并完成初步选址（图 9g）。

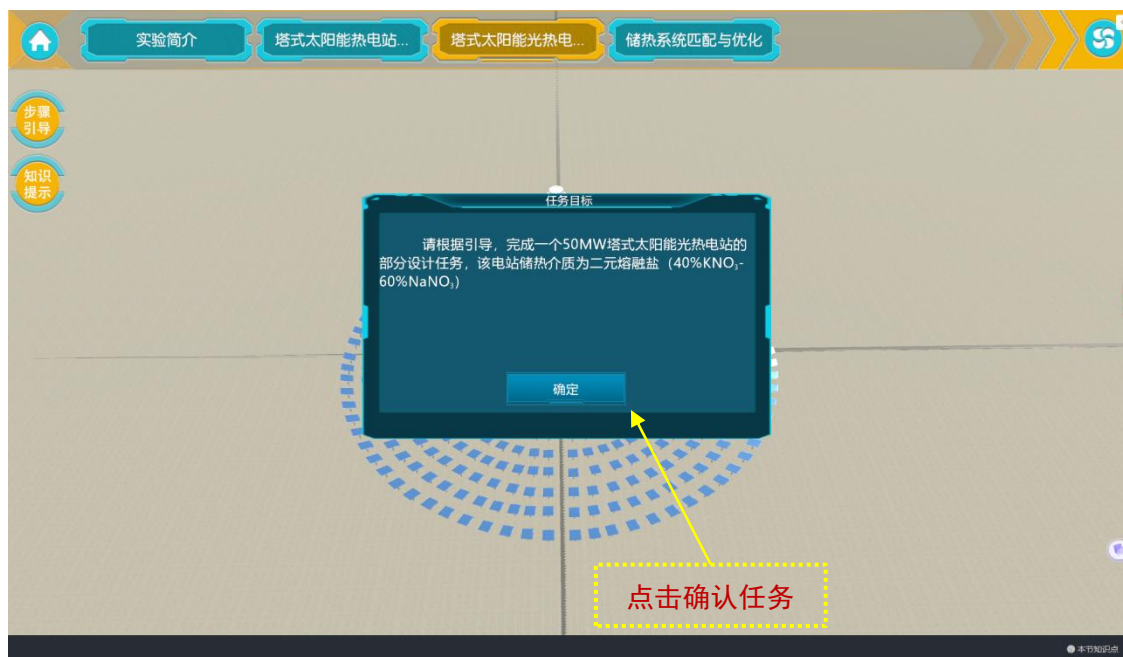


图 9a 电站初步选址影响因素任务响应

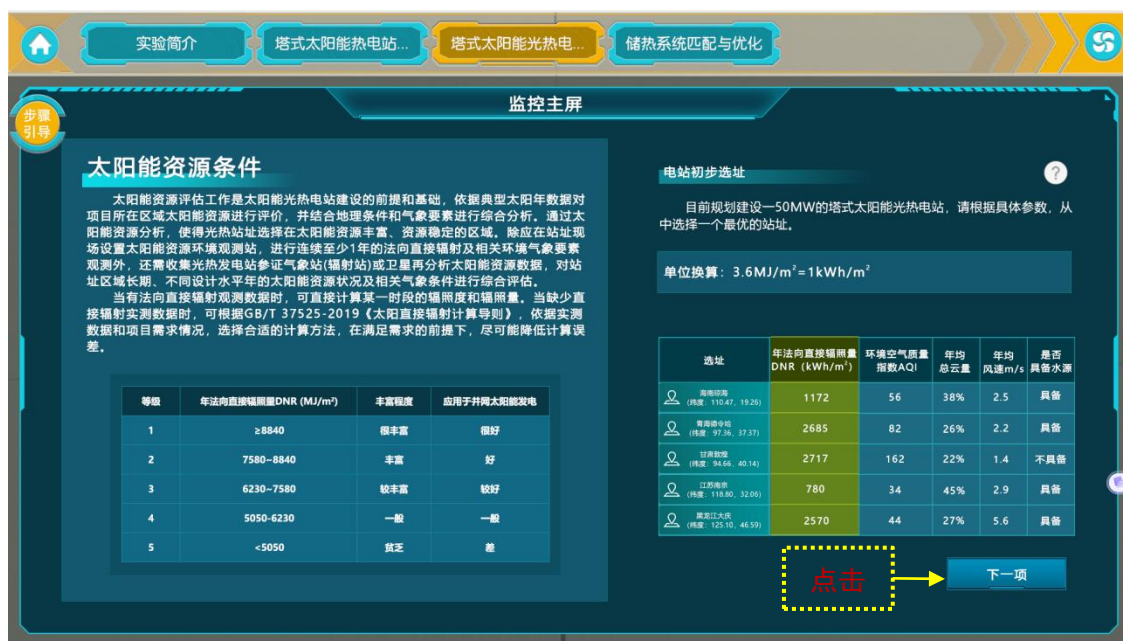


图 9b 电站初步选址影响因素（一）——太阳能资源条件



图 9c 电站初步选址影响因素（二）——空气质量



图 9d 电站初步选址影响因素（三）——云状况



图 9e 电站初步选址影响因素（四）——风速



图 9f 电站初步选址影响因素（五）——其他因素



图 9g 电站初步选址——站址初步选择

3.2.2 步骤 8：吸收器额定热输出功率测算（数据采集+设计计算）

掌握吸收器额定热输出功率的计算方法：点击对话框，确认设计任务，进入吸收塔高度设计子环节（图 10a），阅读上方文字介绍，掌握吸收器额定热输出功率的基本公式，计算点击进入“电站监控室”（图 10b 右侧闪烁提示），读取运行温度参数，代入左侧公式，完成吸收器额定热输出功率计算（图 10b 左侧）。



图 10a 吸收塔高度设计任务确认



图 10b 吸收器额定热输出功率测算

3.2.3 步骤 9：吸收塔高度设计（设计计算）

掌握吸收塔高度的设计计算方法：阅读并掌握吸收塔高度计算的基本公式，读取上一步吸收器额定热输出功率的计算数据，代入公式，完成吸收塔高度计算，并在数据图上绘制出计算数据（图 11），确认所计算的高度在工程要求的经济高度范围内（虚线范围内），同时观察不同参数对吸收塔高度的影响。



图 11 吸收塔高度计算

3.2.4 步骤 10：法向直接辐照度测定（虚拟测量）

掌握太阳法向直接辐照度测定方法：点击提交数据后自动进入定日镜场设

计子环节，根据屏幕闪烁提示，点击测试“获取 I_{DNI} 值”，获取选址地太阳法向直接辐照度的测量数据（图 12）。

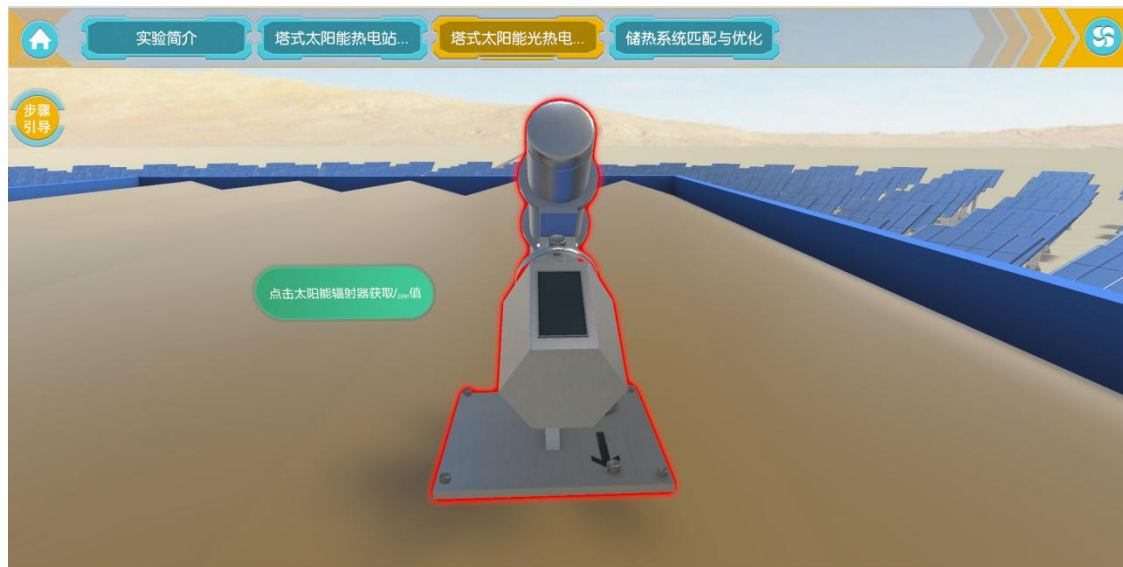


图 12 太阳法向直接辐照度测定

3.2.5 步骤 11：定日镜场总面积估算（设计计算）

掌握定日镜场总面积的估算方法：点击确认任务（图 13a），掌握定日镜场总面积计算公式，并依次确认上一步完成测量的选址地太阳法向直接辐照度、镜场效率、光热及光电转换效率等数据，计算不考虑储热配置时（太阳倍数 $SM=1.0$ ）的定日镜场总面积，输入并保存数据（图 13b）。



图 13a 定日镜场面积计算任务确认



图 13b 定日镜场总面积计算

3.2.6 步骤 12：定日镜型号选择及数量计算（方案选择+设计计算）

掌握定日镜面积选择依据及数量计算方法：点击进入定日镜场设计子环节，阅读上方文字介绍，掌握单面定日镜场面积选配原则，点击下拉菜单并确认选择某一型号的定日镜，记录该型号定日镜的单面定日镜面积，计算定日镜数量，输入并保存数据（图 14）。

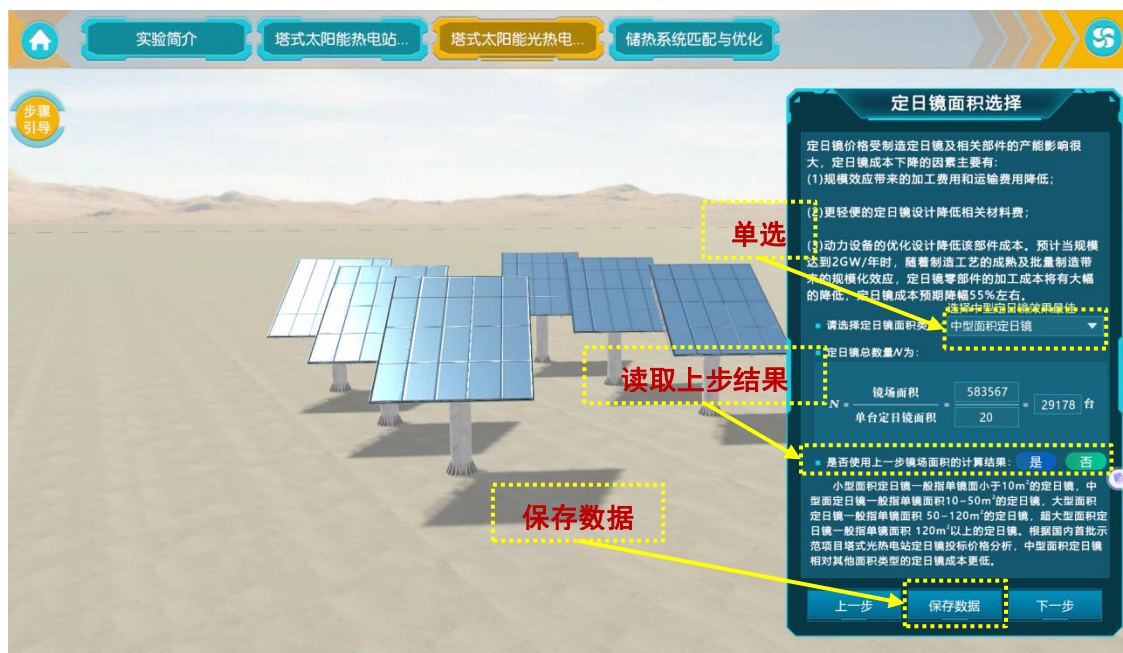


图 14 定日镜面积类型选择

3.2.7 步骤 13：定日镜场辐射交错排列布置（设计计算）

掌握定日镜场布置原则：点击进入定日镜场设计子环节，阅读上方文字介绍，掌握定日镜场布置的基本原则与计算公式，结合示意图逐一确认计算参数，计算定日镜径向及周向间距，输入并保存数据（图 15a）。点击“调节定日镜”按钮，转入定日镜调节场景。结合辐射交错布置阵列示意图，并依据前面计算的定日镜周向及径向间距，依次选择“调整 ΔR 距离”（径向）和“调整 ΔZ 距离”（周向）按钮，通过滑动滑块调节定日镜位置，然后点击“确定”按钮，确认调节（图 15b）。



图 15a 定日镜阵列间距计算

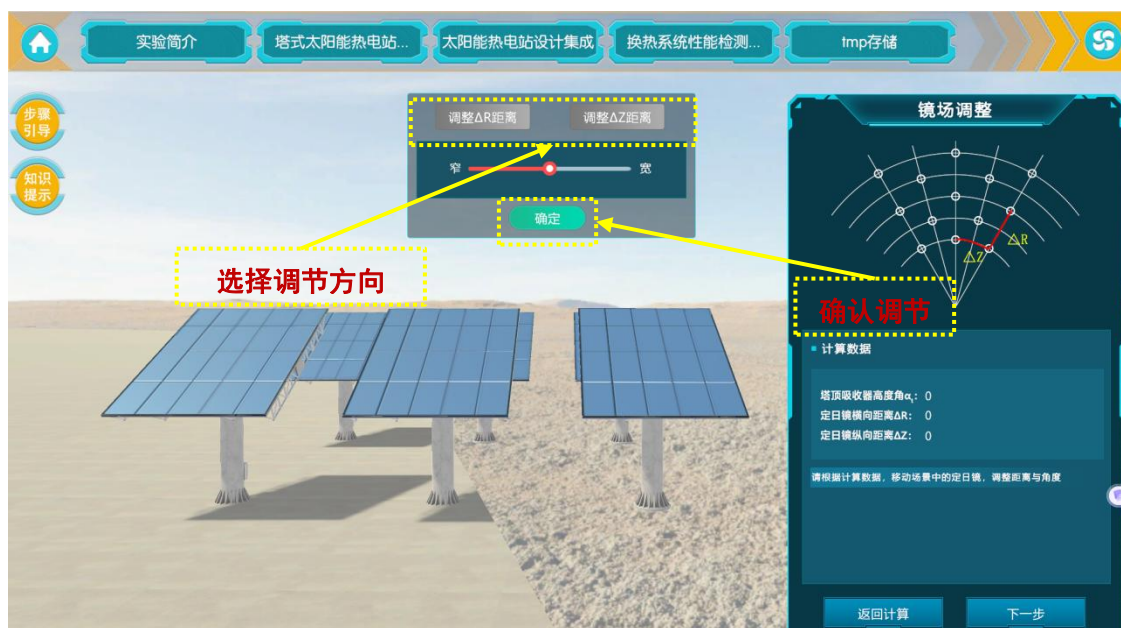


图 15b 定日镜位置调节

3.3 环节三：储热系统匹配与优化

本环节包含镜场效率预测、储热系统优化设计、最大有效储热容量评价，共3个子环节，对应交互步骤14~18，旨在帮助学生通过对镜场效率的预测计算，太阳倍数和储热时长优化组合的容错探究，以及对系统最大有效储热容量的科学评估，深入理解储热系统匹配与优化的工程思想，完成“应用探索”层面的训练。具体步骤如下：

3.3.1 步骤14：镜场余弦效率比较（图文学习）

掌握余弦效率与纬度的依变关系：点击不同纬度，观察余弦效率及镜场布置形式的变化。初步了解镜场效率的影响因素，明晰余弦效率与纬度的依变关系（图16a~16d）。

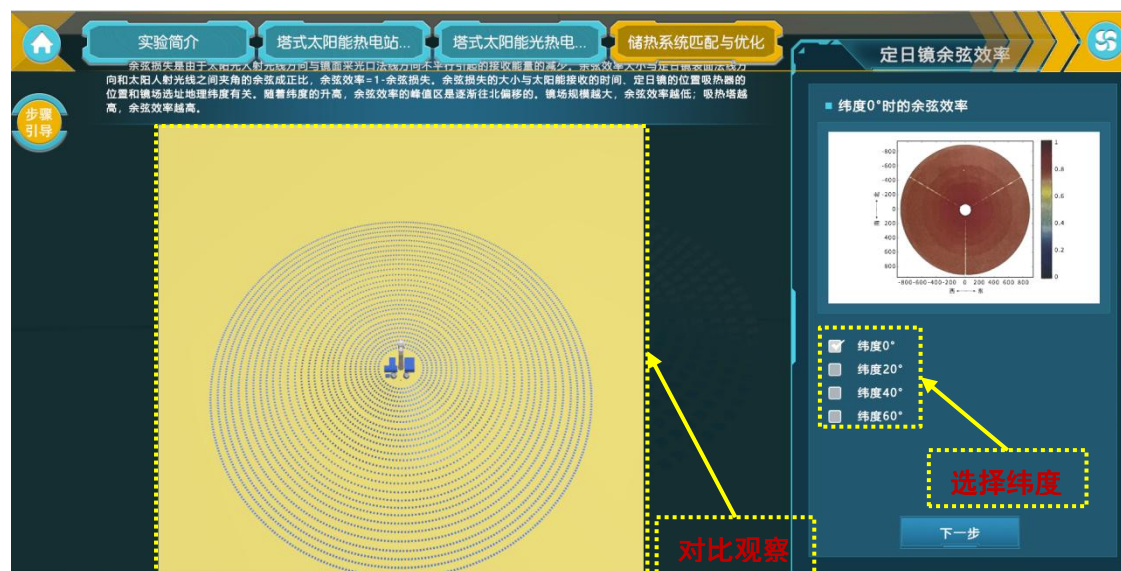


图 16a 镜场布置及余弦效率随纬度的变化——北纬 0°地区

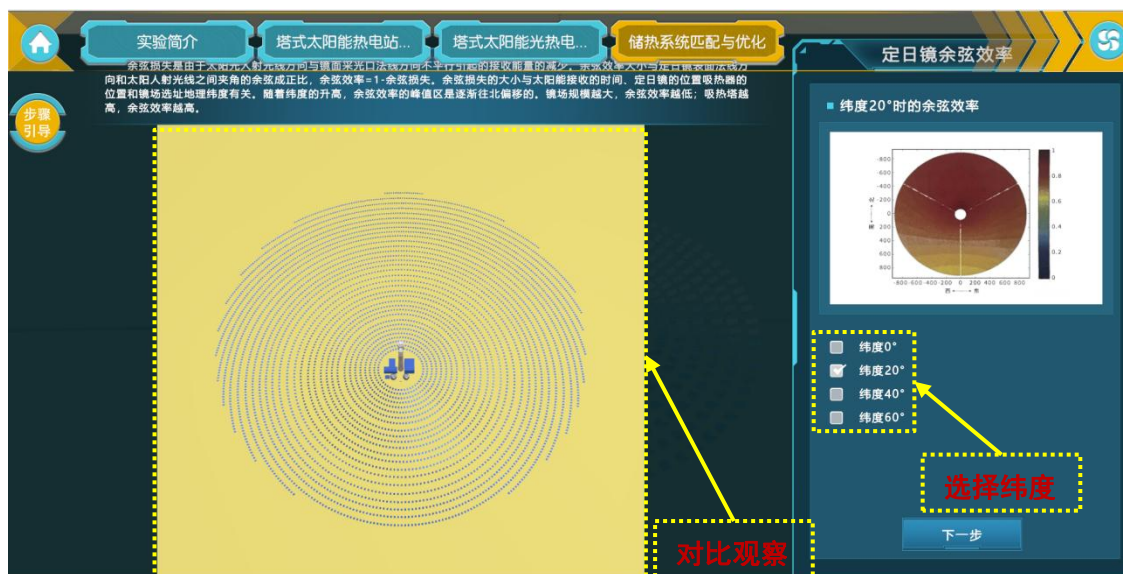


图 16b 镜场布置及余弦效率随纬度的变化——北纬 20°地区

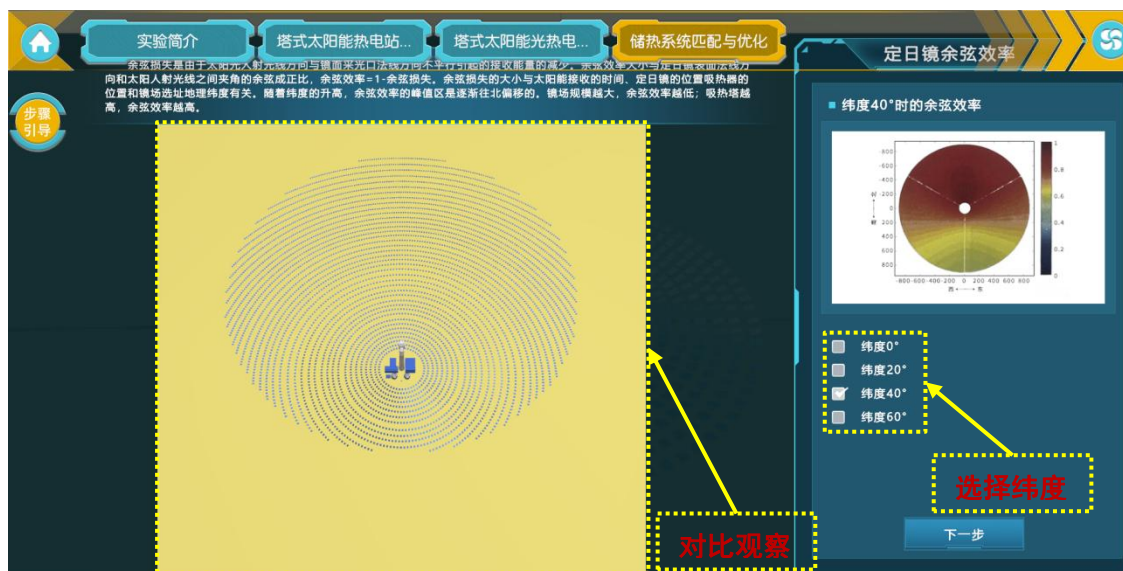


图 16c 镜场布置及余弦效率随纬度的变化——北纬 40°地区

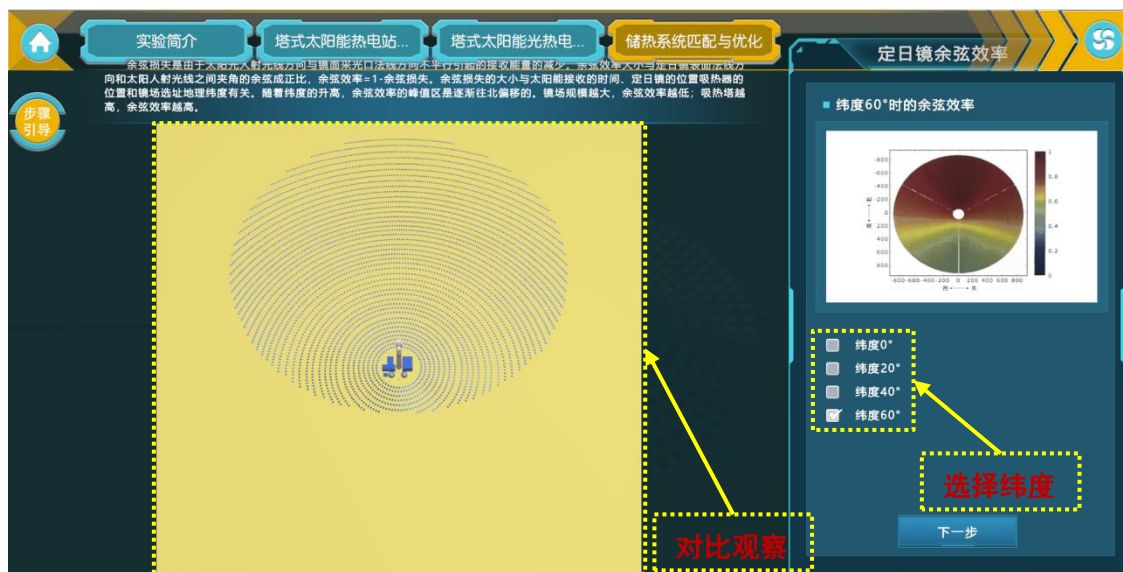


图 16d 镜场布置及余弦效率随纬度的变化——北纬 60°地区

3.3.2 步骤 15：镜场效率计算及最终选址（方案比较）

掌握镜场效率的计算方法与影响因素：点击进入镜场效率计算，鼠标滑过每个效率，逐一阅读并了解符号含义。对应解读镜场效率的计算公式，点击获取各选址“余弦效率”和“大气衰减效率预测”（注意，如第二环节初步选址没有完成，本环节将无法获取数据），点击计算，在表格中获取各选址地镜场效率（图 17），根据镜场效率计算结果，确认最终选址地（可以修改第二环节的选址地）。

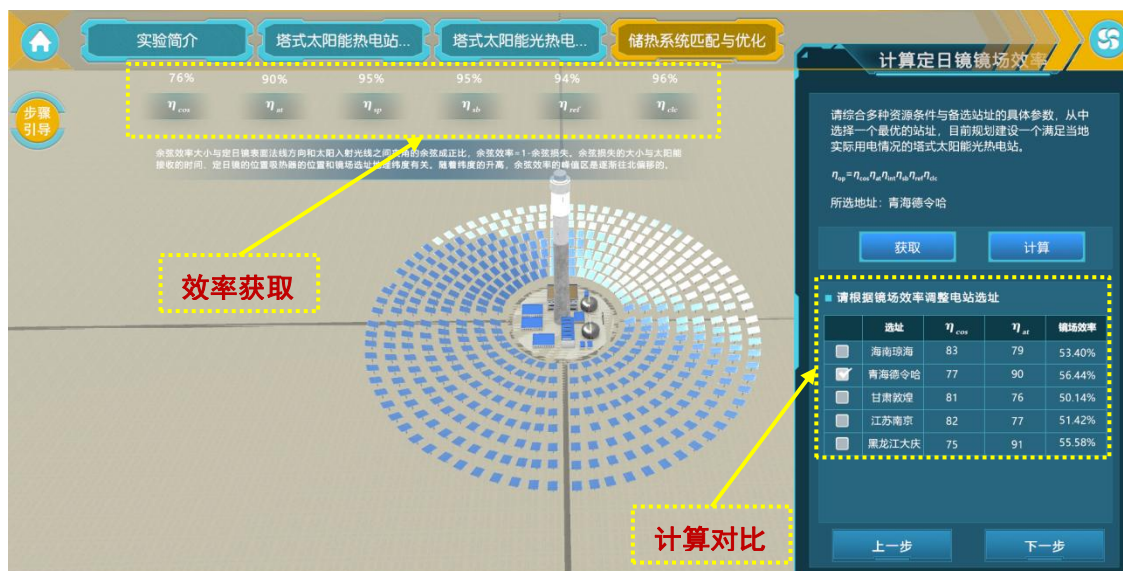


图 17 镜场效率计算及最终选址

3.3.3 步骤 16：储热系统优化设计（图文学习+优化探究）

掌握以 LCOE 最低为目标函数的储热系统优化设计方法：点击进入储热系统优化设计子环节，系统自动读取电站选址地、吸收塔高度、定日镜数量、法向直接辐照度及镜场效率的数据，阅读文字说明，掌握太阳倍数及储热时长的基本概念，依次调节不同的太阳倍数和储热时间，分别计算并记录对应的度电成本，比较并以度电成本最低为目标优化出最优的太阳倍数与储热时长的配置组合（图 18）。



图 18 储热系统优化设计

3.3.4 步骤 17：熔盐罐液位测量与储热容量评估（虚拟测量+计算）

掌握储热系统可循环熔盐量计算方法：点击进入最大有效储热容量评估子环节（图 19a），了解熔盐罐液位测量的仪器及方法，点击开始测量，获取高温熔盐罐和低温熔盐罐的液位，计算可循环熔盐体积及质量（图 19b）。

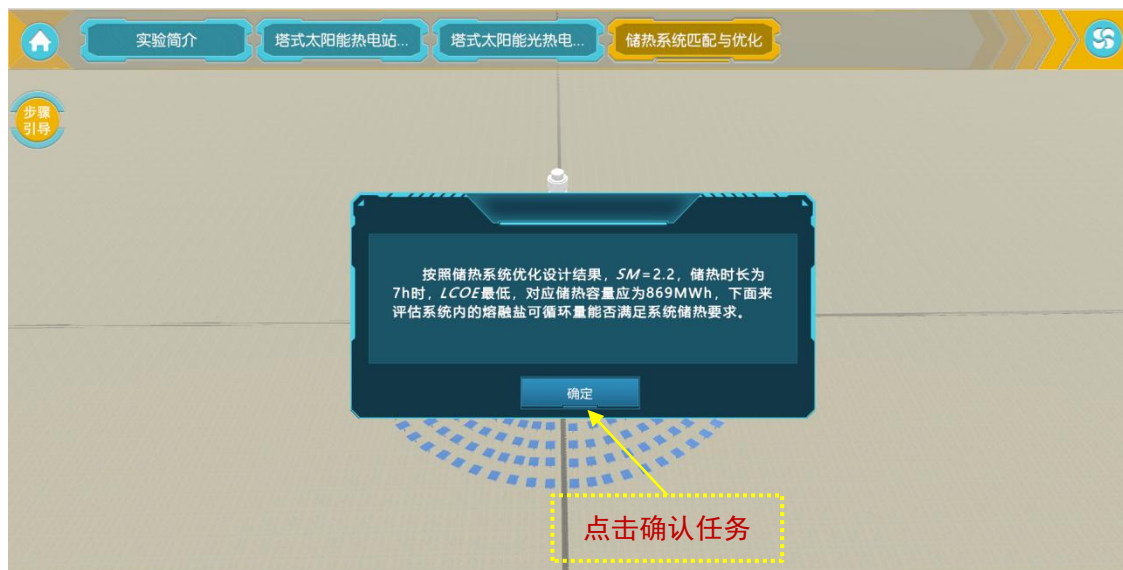


图 19a 最大有效储热容量评估任务确认

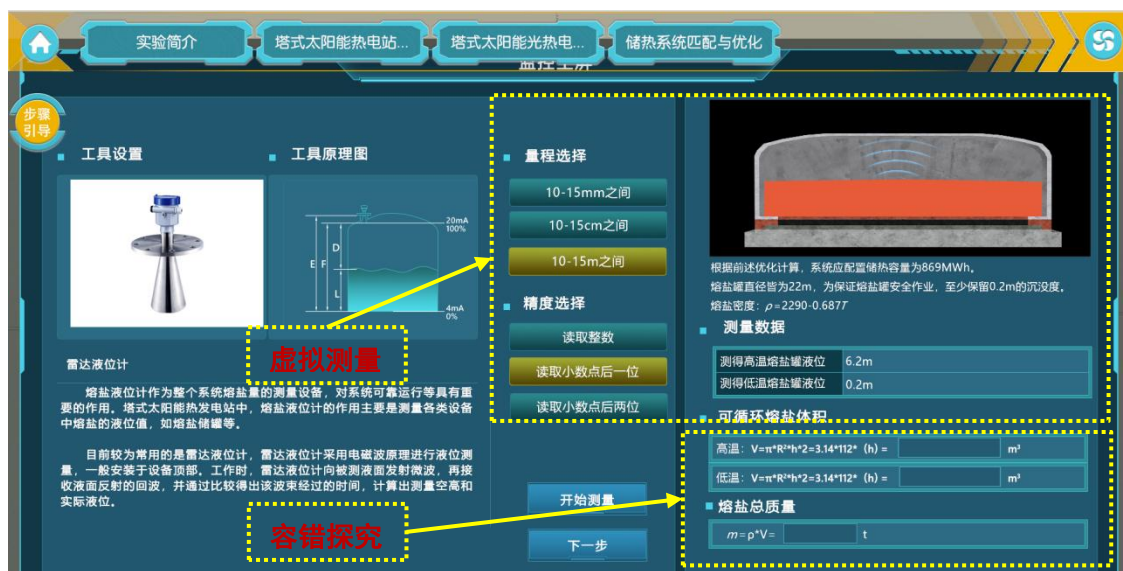


图 19b 熔盐罐液位测量与可循环熔盐量计算

3.3.5 步骤 18：最大储热量计算（计算评价）

掌握系统最大有效储热容量的评估方法：点击进入最大有效储热容量评估子环节，通过阅读上方文字，了解系统最大有效储热容量的评估方法，通过温度与比热容的变化关系图了解二元熔盐温度与比热容的依变关系。计算当前液位下系统最大有效储热容量，并与系统要求的储热时长对应的储热容量进行比较，判断当前液位能否满足储热需求，并判断是否需要补液，如果需要，计算并填写补液量（图 20）。

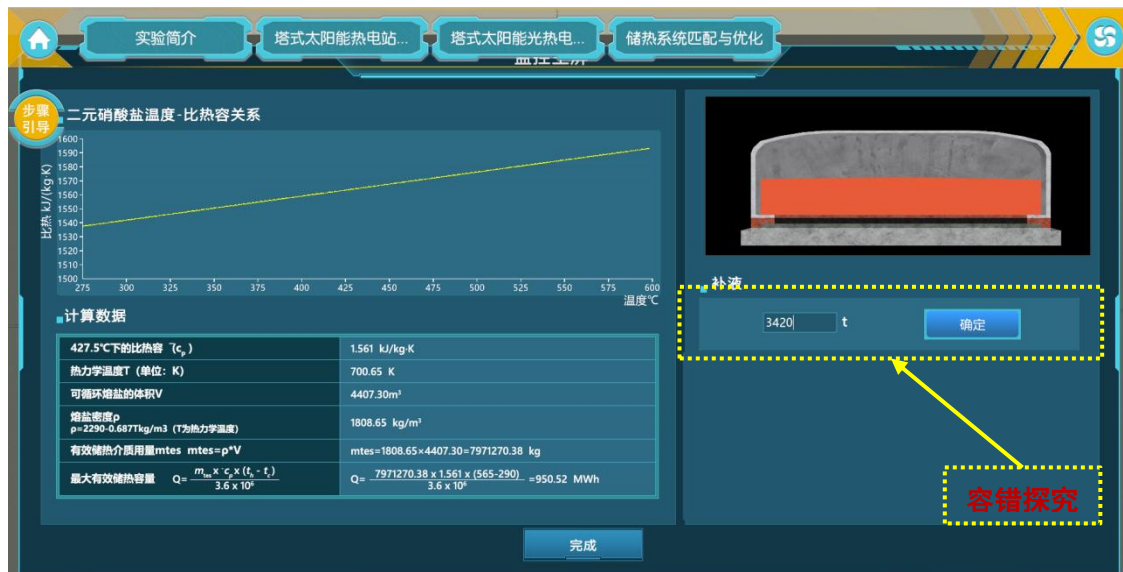


图 20 最大储热量及补液量计算