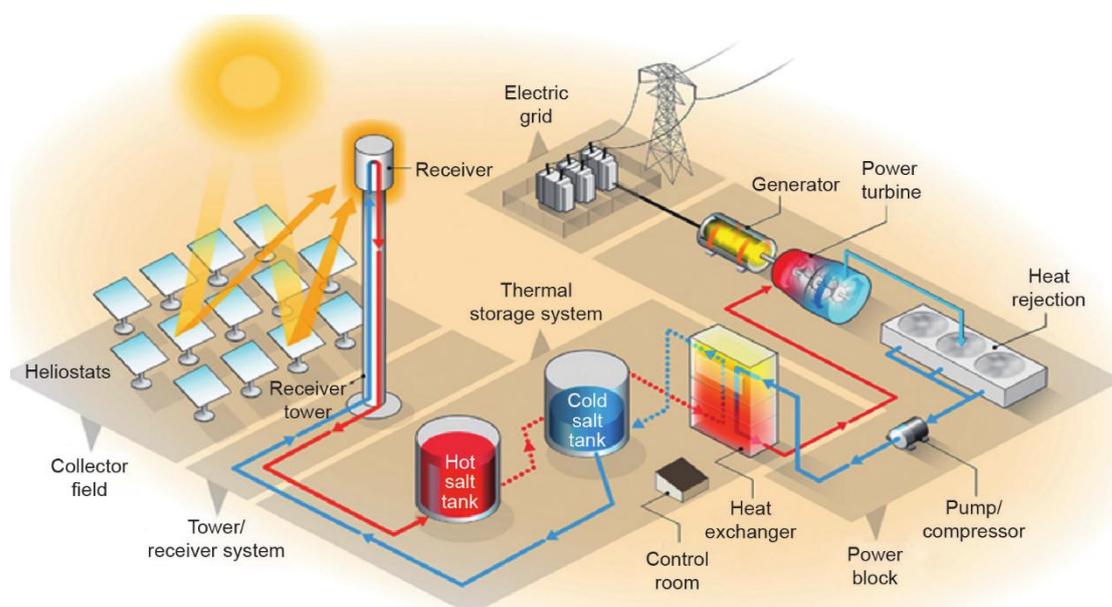


塔式太阳能热发电与储能虚拟 仿真教学指导书

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

塔式太阳能热发电与储能虚拟仿真实验教学设计

实验名称		塔式太阳能热发电与储能虚拟仿真实验		
所属课程		太阳能光热发电系统	课时安排	2 学时
学情分析		1、学生已经学习了四种基本的太阳能光热发电系统； 2、学生对塔式太阳能光热发电系统的认知停留在书面上； 3、学生对塔式太阳能光热电站储热系统配置不甚了解。		
实验 教学 目标	知识	对塔式太阳能热发电站的系统组成有清晰的认知，理解并掌握塔式太阳能热发电系统运行流程，能清楚描述定日镜、吸收器、熔融盐储罐以及蒸汽发生器等核心设备的工作原理，明确影响塔式太阳能光热发电与储能成本的关键因素。		
	能力	能够独立完成塔式太阳能热发电站选址、镜场布置及储热容量配置，具备多参数交叉影响下的方案优选能力，能够以度电成本为目标函数，通过控制变量法实现塔式太阳能热发电站的镜场及储热系统的优化配置。		
	素质	能深入领会太阳能光热应用对于实现双碳目标的重大意义，具有敢闯会创、锐意进取的创新精神，能于、勇于并乐于投身新能源的相关领域及行业，为祖国的能源事业贡献力量。		
实验 内容	重点	1、塔式太阳能光热电站基本认知； 2、塔式太阳能热电站设计集成； 3、储热系统匹配与优化。		
	难点	1、最低度电成本 LCOE 的探究； 2、最大有效储热容量评估与系统可循环熔盐质量的测算。		
实验 资源	线上	https://xnfzpt.cslg.edu.cn/		
	线下	[1] 塔式太阳能光热电站关键控制技术[M]. 河海大学出版社, 2022 . [2] 塔式太阳能光热发电站设计[M]. 中国电力出版社, 2019. [3] GB/T 37526-2019 太阳能资源评估方法[S]. [4] GB/T 33698-2017 太阳能资源测量 直接辐射[S]. [5] GB/T 41307-2022 塔式太阳能热发电站吸热器检测方法[S]. [6] GB/T 40099-2021/IEC TS 62862-1-2:2017 太阳能光热发电站代表年太阳辐射数据集的生成方法[S]. [7] GB/T 41308-2022 太阳能热发电站储热系统性能评价导则[S]. [8] GB/T 41303-2022 塔式太阳能热发电站吸热器技术要求[S]. [9] GB/T 41087-2021 太阳能热发电站换热系统技术要求[S]. [10] GB/T 40821-2021 太阳能热发电站换热系统检测规范[S]. [11] GB/T 41992-2022 太阳能热发电站运行指标评价导则[S].		
思政元素		1、 光热发电，助力双碳 ——吸收塔标语； 2、 工匠精神 ——LCOE 容错探究。		
教学方法		1、 科学观察法 ：环节一的步骤 1~6； 2、 任务驱动法 ：环节二的步骤 7、8、11 和环节三的步骤 16、17； 3、 容错探究法 ：主要应用于环节三的步骤 15~18。		

教学思想

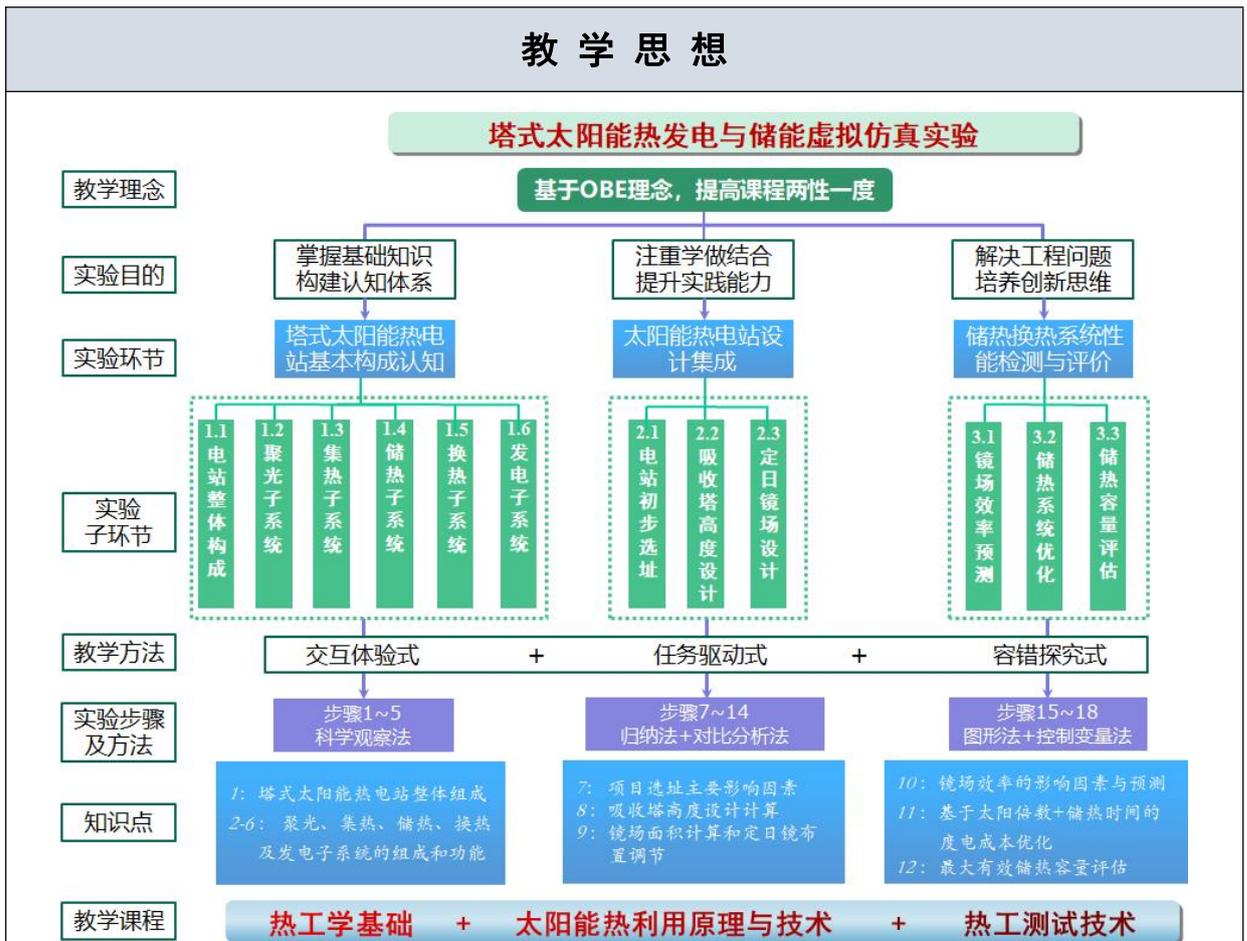
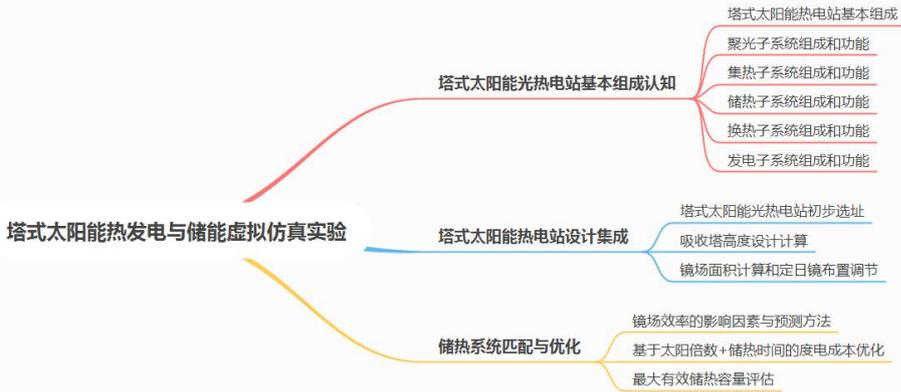
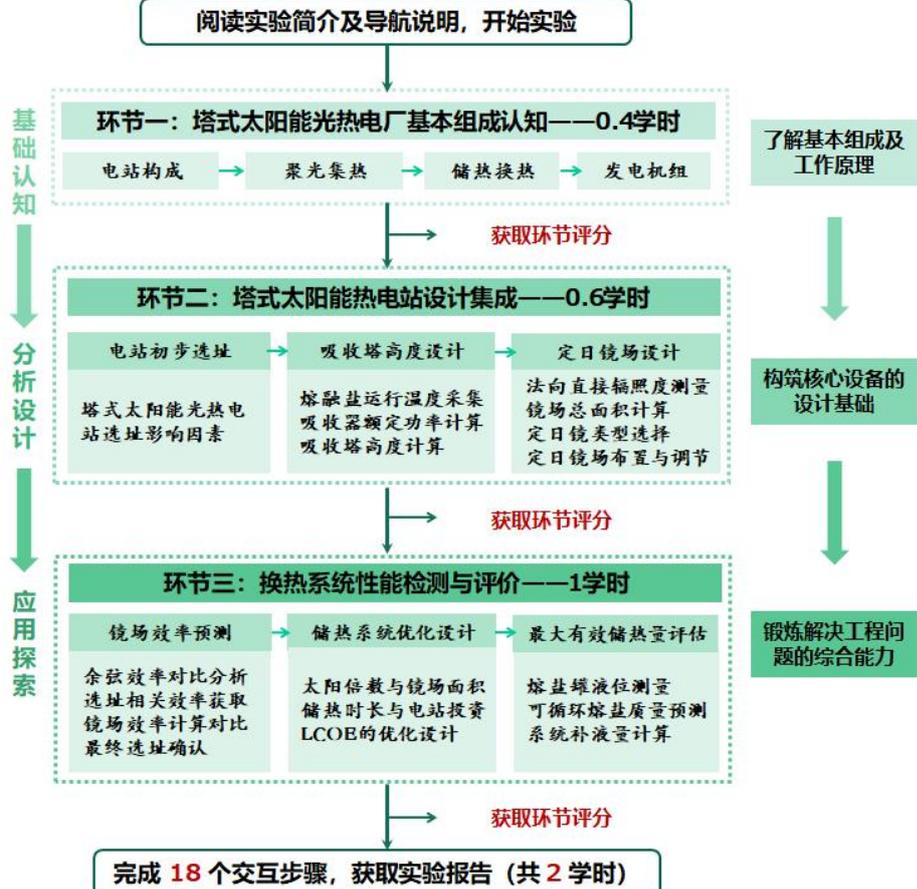


图1 塔式太阳能热发电与储能虚拟仿真实验教学设计脉络图

教学安排

教学环节	教学内容	教学工具
导入实验 1分钟	诱思导入 首先回顾太阳能热发电系统有哪些？塔式太阳能光热电站有何特点？储热系统如何配置？以一连串的问题导入实验教学。	PPT
	教师活动与设计意图	
	1、以回顾+提问的模式导入实验，过渡自然，便于学生的思维衔接； 2、通过预设问题激发学生学习兴趣。	
	学生活动	
	1、回顾太阳能热发电系统主要内容； 2、积极思考问题。	

<p>目标和内容 1分钟</p>		<p>思维导图</p>
	<p>教师活动与设计意图</p> <p>1、介绍本课题目标、知识脉络及重点； 2、明确目标和内容，让学生有的放矢。</p>	<p>学生活动</p> <p>1、明确本节学习目标； 2、简单了解学习思路。</p>
<p>实验简介 2分钟</p>	 <p>图2 塔式太阳能热发电与储能虚拟仿真实验总体设计原理图</p>	<p>PPT</p>
	<p>教师活动与设计意图</p> <p>1、让学生明确实验流程； 2、让学生明确实验评价标准。</p>	<p>学生活动</p> <p>认真听讲并记录。</p>

学生
操作
+
教师引
导探究
85 分钟

本实验设计了“基础认知、分析设计、应用探索”三个层次的实验环节，运用“任务驱动式”、“交互体验式”、“容错探究式”的教学方法开展教学：通过设置明确的任务要求和科学目标，引导学生应用科学观察法、对比法、图像法、控制变量法和案例分析法等认真开展实验操作以及互动讨论，使学生“身临其境”地开展“沉浸式”交互操作和容错式探究，循序渐进地开展“基本原理知识掌握、分析设计思维构筑、创新思维能力提升”的学习实践过程。

在**塔式太阳能光热电站基本组成认知**环节，通过设置“电站整体构成”、“聚光子系统”、“集热子系统”、“储热子系统”以及“换热子系统”五个子环节，将塔式太阳能光热电站基本组成直观呈现给学生。学生根据任务要求和步骤引导，通过交互式操作和多角度科学观察，结合知识提示和知识角的详细介绍，实现对塔式太阳能光热电站各组成部分的结构、功能及其相关设备的认知。该环节帮助学生掌握塔式太阳能光热电站的基本组成和工作原理，构建科学全面的认知体系，为学生后续开展塔式太阳能光热电站设计、储热系统匹配与优化等环节奠定坚实的理论基础。

在**塔式太阳能光热电站设计集成**环节，通过提供塔式太阳能光热电站的基本设计要求、参数及框架，引导学生根据任务要求开展电站设计。在吸收塔高计算子环节，引导学生读取控制室温度信号反馈，以此测算吸收器额定输出热功率。在定日镜面积计算子环节，穿插法向直接辐照度测量，培养学生对测量系统的控制力；定日镜面积选择子环节，采用对比分析式教学方法，允许学生多次尝试，在对比分析中总结规律。在定日镜场布置子环节中，与集热塔高度子环节形成关联，使学生深入理解集热子系统和聚光子系统间的内在联系及相互影响，同时设置交互体验式的定日镜间距调节，增强趣味性、操作性和互动性，培养学生构建理论设计、仿真验证的工程设计思维，为其今后根据实际需求全面开展塔式太阳能光热电站的设计打下基础。

在**电站储热系统匹配与优化**环节，采用案例分析与容错探究的方法，通过任务驱动，引导学生为所涉及的光热电站匹配储热子系统，从技术经济学的角度出发，以度电成本为目标函数，以优化设计的思想分析问题，学生可以多次尝试，通过电站选址、镜场布置、储热时间等多参数优化，寻找最低的度电成本。实验过程中可根据系统评判不断优化设计，同时，设置了可视化数据图形界面，学生优化过程的关键数据可以实时地在数据图上呈现，学生在优化的过程中，可以更直观地体会气象条件对于镜场布置以及镜场效率的影响，理解太阳倍数和储热时间对于发电成本的影响，同时明晰电站初投资及运行维护等成本构成，锻炼提升应用所学知识解决工程实际问题的创新能力。

(2) 实验方法

在虚拟仿真实验教学过程中，为加强学生对于知识的理解和掌握，综合应用了**科学观察法**、**任务驱动法**、和**容错探究法**等多种实验方法。

科学观察法主要应用于环节一的步骤 1~6，学生通过观察，可以充分认识

塔式太阳能光热电站的整体布局。核心设备采用 3D 高仿真建模,并配备 360° 旋转运行,学生可以实现从不同角度的外观到内部结构的全方位观察。此外,在环节二的步骤 14,也采用了科学观察法,学生可以通过观察,直接对比不同纬度地区的余弦效率及镜场布置方式。培养学生认真仔细的工匠精神。

任务驱动法主要应用于环节二的步骤 7、8、11 和环节三的步骤 16、17。在环节二中,任务驱动法让学生明确下一步实验的主要目的,带着任务开展实验。步骤 7 中学生会在任务驱动下认真对比不同选址地的各项影响因素;步骤 8 中,学生可以直接明确该子环节的设计任务;步骤 11 中,任务对话框不仅起到驱动作用,还提示学生此时尚未配备储热系统容量;步骤 16 和 17 则在任务驱动的同时为学生提供优化设计的思路以及储热容量配置的最低需求。

容错探究法主要应用于环节三的步骤 15~18。步骤 15 与环节二的步骤 7 形成联动,在步骤 7 中,学生进行项目初步选址,由于此时加载的影响因素尚不完全,因此,学生可在步骤 15 中,完成镜场效率的预测后,完成最终选址,在此环节,学生可以更换选址地。通过两环节联动式的容错探究,能够强化学生理解和掌握项目选址的各个影响因素。步骤 16 是优化设计问题,答案不唯一,学生通过控制变量法探究 LCOE 的最低值,越接近系统设置的最优值,得分越高。步骤 17 和 18 的计算也可以重复进行,补液量不满足要求时,会提示学生当前系统可循环熔融盐质量不满足要求,无法正常运行,学生可重复计算,修正结果。容错探究的实验环境既增强了实验的科学性、严谨性和趣味性,又能提升学生独立钻研和思考的自主学习能力。

知识点:共 12 个

环节一:塔式太阳能热电站基本组成认知, 6 个知识点

1. 塔式太阳能热电站基本组成
2. 聚光子系统组成和功能
3. 集热子系统组成和功能
4. 储热子系统组成和功能
5. 换热子系统组成和功能
6. 发电子系统组成和功能

环节二:太阳能热电站设计集成, 3 个知识点

7. 塔式太阳能光热电站选址影响因素
8. 吸收塔高度设计计算
9. 镜场面积计算和定日镜布置调节

环节三:储热系统匹配与优化, 3 个知识点

10. 镜场效率的影响因素与预测方法
11. 基于太阳倍数+储热时间的度电成本优化
12. 最大有效储热容量评估

❖ 学生交互性操作步骤，共 18 步

步骤序号	步骤目标要求	合理用时	目标达成度赋分模型	步骤满分	成绩类型
1	完成太阳能光热电站总体构成认知	2min	观看完视频，+2分；	2	操作成绩
2	完成聚光子系统组成和功能认知，掌握定日镜基本结构	3min	完成从总体结构认知页面找到并点击聚光子系统，+1分；点击“结构观察”，完成定日镜观察，+2分；	3	操作成绩
3	完成集热子系统组成和功能认知，掌握吸收器基本结构	3min	完成从总体结构认知页面找到并点击集热子系统，+1分；点击“结构观察”，完成吸收器及吸收塔观察，+2分；	3	操作成绩
4	完成储热子系统组成和功能认知，掌握熔融盐及储罐基本结构	5min	完成从总体结构认知页面找到并点击储热子系统，+1分；点击“热罐”+1分，点击“结构观察”，+1分；点击“冷罐”+1分，点击“结构观察”，+1分；点击“熔盐泵”+1分，点击“结构观察”，+1分；	7	操作成绩
5	完成换热子系统组成和功能认知，掌握换热器基本结构	3min	完成从总体结构认知页面找到并点击换热子系统，+1分；点击“结构观察”，完成换热器结构观察，+2分；	3	操作成绩
6	完成发电子系统组成和功能认知，掌握发电机组基本结构	3min	完成从总体结构认知页面找到并点击发电子系统，+1分；点击“结构观察”，完成发电机组结构观察，+1分；	2	操作成绩
7	完成塔式太阳能光热电站初步选址	5min	点击任务确认，完成4种主要影响因素图文学习，每项+1分，共4分；完成初步选址+1分；	5	操作成绩
8	完成吸收器额定热输出功率测算	4min	点击采集监控室温度信号，+1分；功率计算正确，第一次计算正确+3	4	操作成绩

			分，第二次+2分，第三次+1分（计算误差允许在±5%范围内）；		
9	完成吸收塔高度设计	3min	高度计算正确，第一次计算正确+3分，第二次+2分，第三次+1分（计算误差允许在±5%范围内）；	3	操作成绩
10	完成法向直接辐照度测定	1min	点击确认测试仪表并读数；	1	操作成绩
11	完成定日镜场总面积估算	3min	面积计算正确，第一次计算正确+3分，第二次+2分，第三次+1分（计算误差允许在±5%范围内）；	3	操作成绩
12	完成定日镜型号选择及数量计算	5min	第一次选择正确+3分，第二次+2分，第三次+1分；第一次计算正确+3分，第二次+2分，第三次+1分（计算误差允许在±5%范围内）；	6	操作成绩
13	完成辐射交错排列分布式镜场布置及调节	7min	径向及周向间距计算正确，第一次计算正确各+3分，第二次各+2分，第三次各+1分（计算误差允许在±5%范围内）；径向调节，+1分；周向调节，+1分；	8	操作成绩
14	完成镜场余弦效率比较	2min	选择不同纬度观察镜场布置及余弦变化，每点击一次+0.25分；	1	操作成绩
15	完成镜场效率计算及最终选址	3min	余弦效率及大气衰减效率获取，+1分；镜场效率计算，+1分；最终选址，第一次正确+3分，第二次正确+2分，第三次正确，+1分；	5	操作成绩
16	完成储热系统优化设计	8min	函数赋分， $15 \times (1 - \text{LCOE})$ 计算结果与最优值偏差）；	15	操作成绩
17	完成熔盐罐液位测量与储热	10min	选择仪表参数，第一次正确+3分，第二次正确+2	20	操作成绩

	容量评估		分，第三次正确，+1分； 读取液位，+2分；计算 部分采用函数赋分，高、 低温熔盐罐熔岩体积与 可循环熔融盐质量，均为 $5 \times (1 - \text{计算结果偏差})$ ；		
18	完成系统最大 储热容量预测 并计算补液量	6min	函数赋分， $9 \times (1 - \text{补液量计算结果偏差})$ ；	9	操作成绩

❖ 交互性步骤详细说明

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

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。

步骤1：塔式太阳能热电站系统构成认知（视频学习）

操作目的：掌握塔式太阳能光热电站的总体构成

操作过程：学生从平台登录进入软件欢迎页面，点击“确定”按钮，自动进入环节一。



图 3a 实验开始界面

自动进入巡航动画,系统将以导航模式引导学生逐一参观塔式太阳能光热电站的整体机构及主要设备。(如学生非首次做实验,可选择跳过此动画)

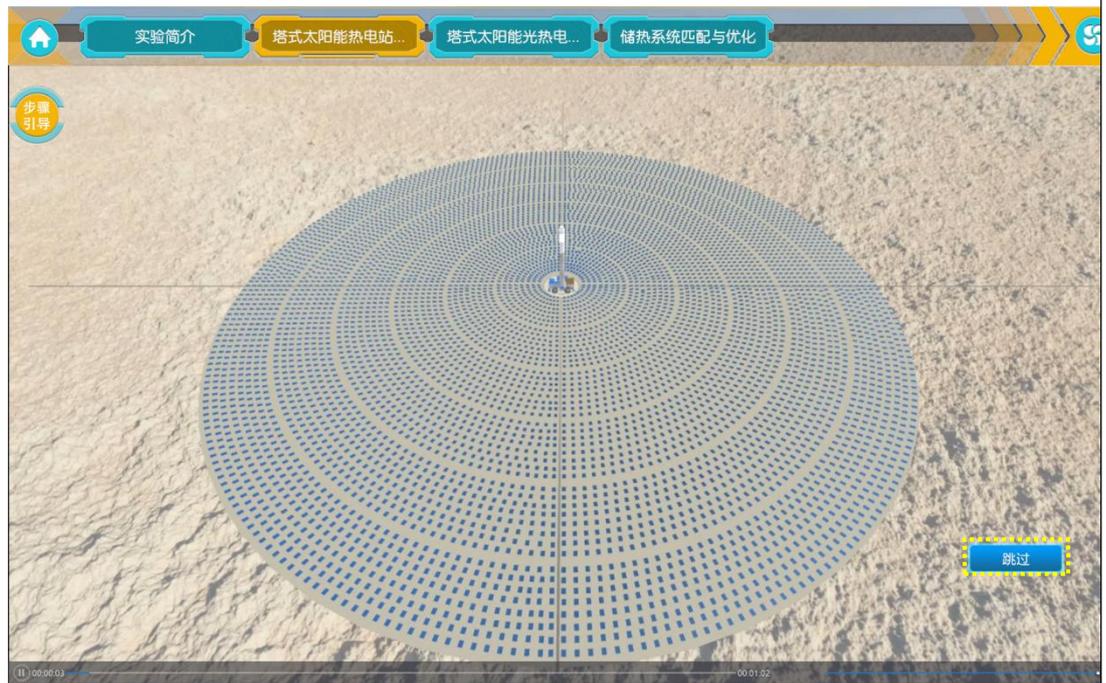


图 3b 电站巡航动画——鸟瞰图



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

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 3g 塔式太阳能光热电站系统组成导航页面

操作结果：学生跟随巡航观看完视频动画，可对塔式太阳能光热电站基本系统构成有初步认知。

步骤 2：聚光子系统组成和功能认知（图文学习）

操作目的：掌握聚光子系统组成及核心设备定日镜结构与工作原理。

操作过程：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。

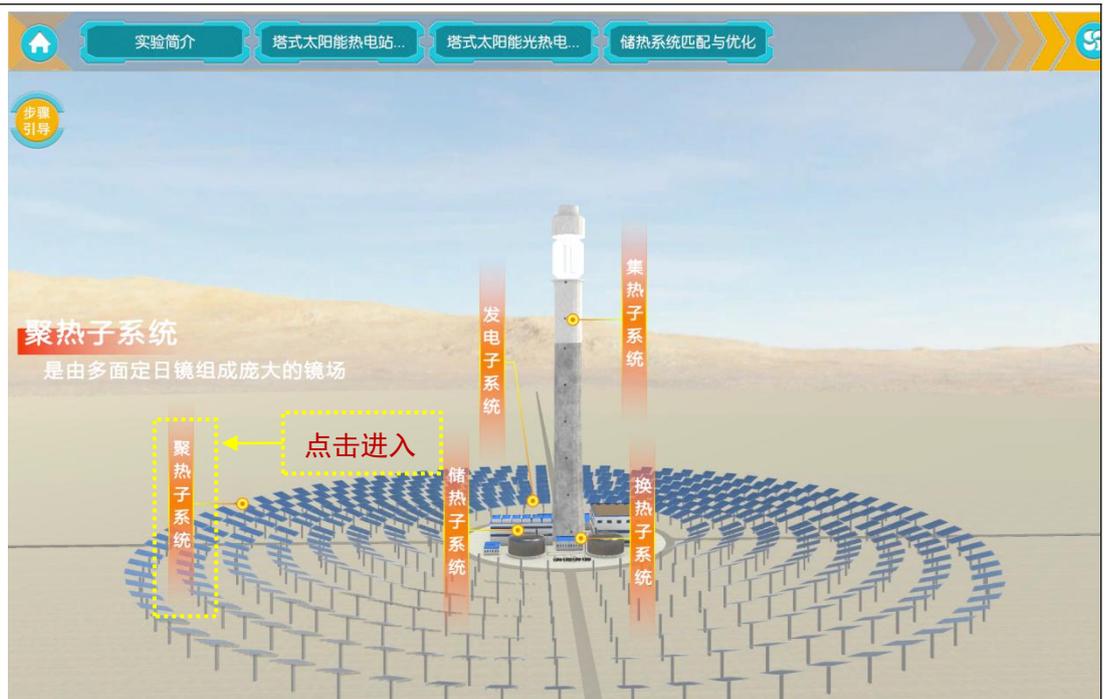


图 4a 塔式太阳能光热电站系统组成导航页面——聚光子系统

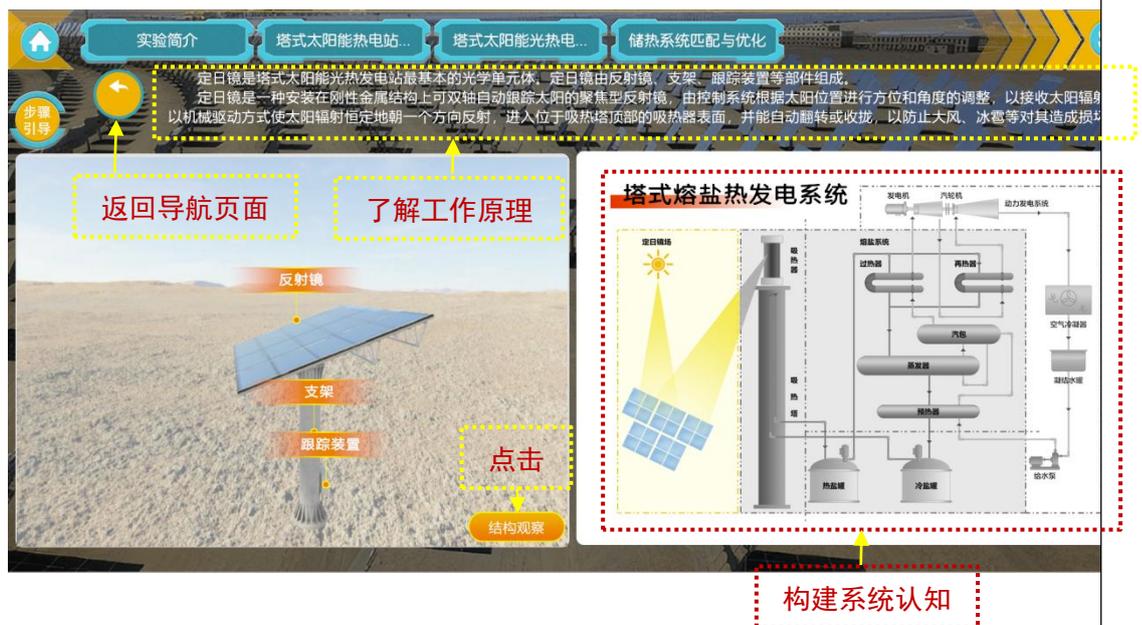


图 4b 聚光子系统组成和功能认知——定日镜镜面

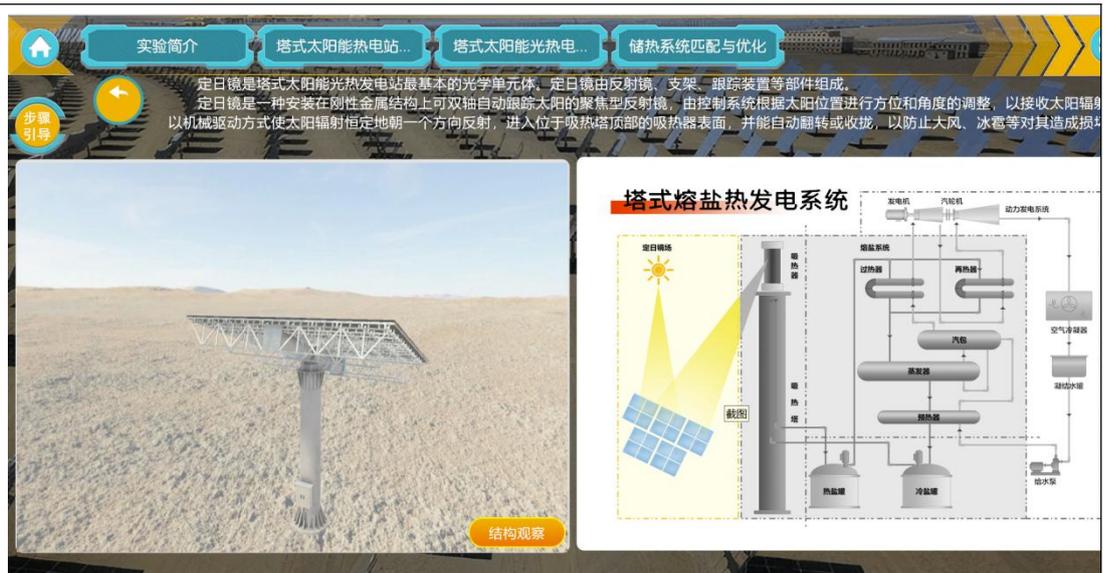


图 4c 聚光子系统组成和功能认知——定日镜结构

操作结果：学生可了解到聚光子系统的基本构成单元为定日镜，并能够近距离全方位观察定日镜结构，了解其反射聚光的工作原理。

步骤 3：集热子系统组成和功能认知（图文学习）

操作目的：掌握集热子系统组成及核心设备吸收器结构与工作原理。

操作过程：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（图 5c），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。

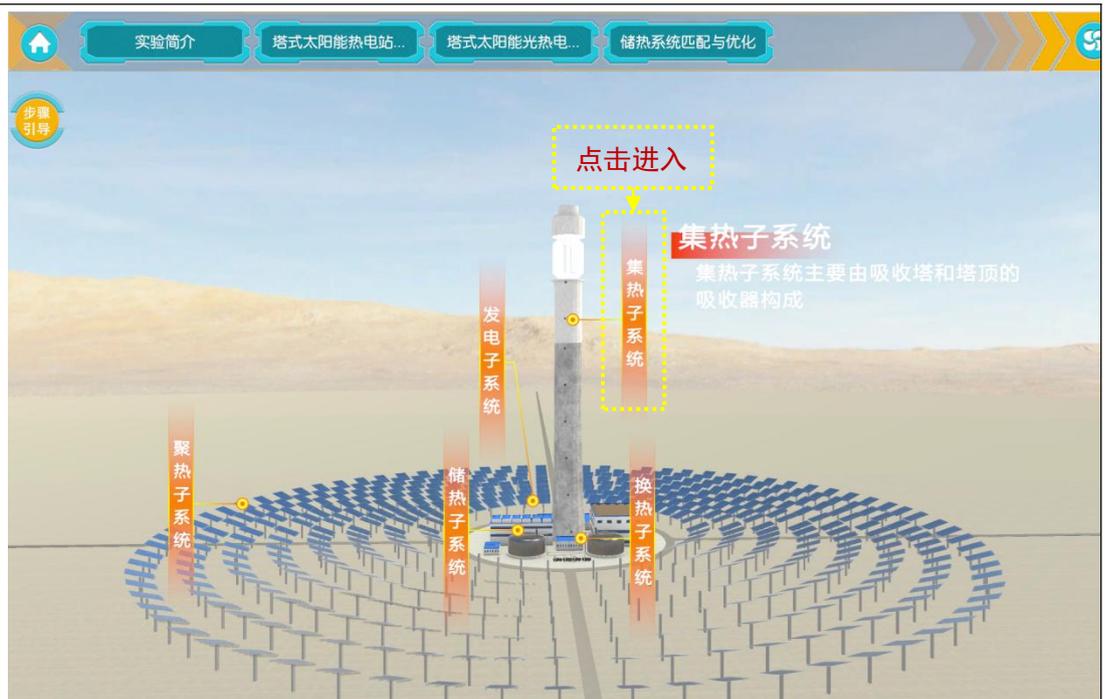
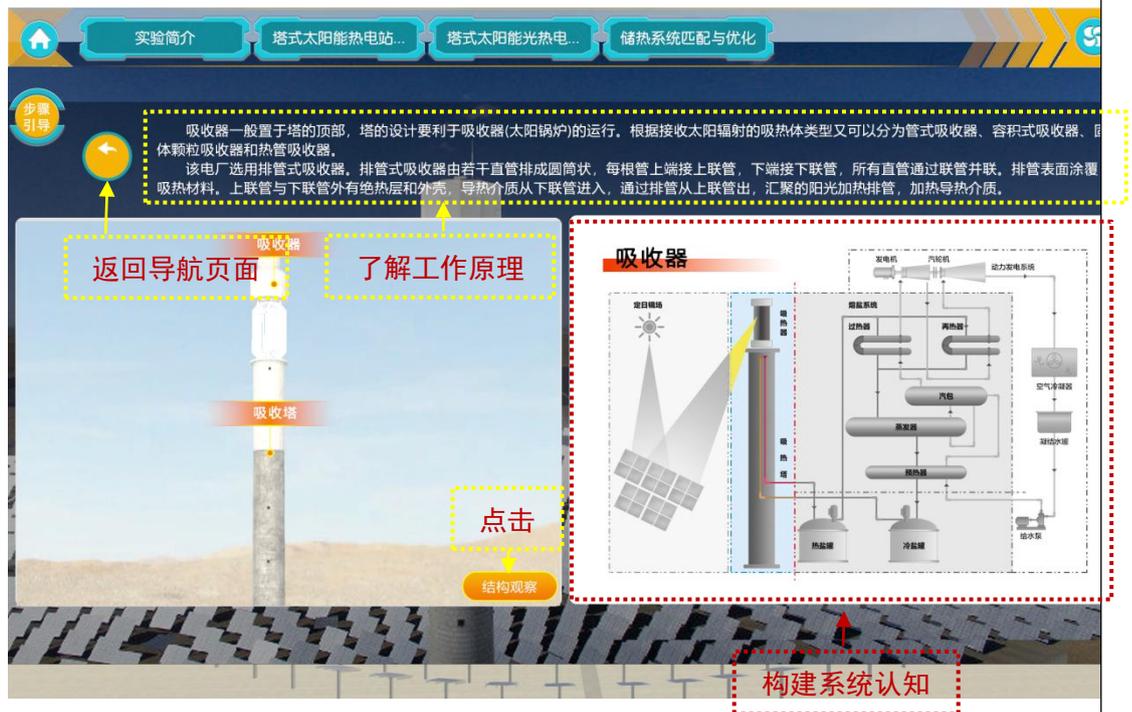


图 5a 塔式太阳能光热电站系统组成导航页面——集热子系统



操作结果：学生可了解到集热子系统由吸收塔和塔顶的吸收器组成，并能够近距离全方位观察吸收器结构以及其工作时的炫光状态（对视力无影响），了解其光热转换过程的工作原理。

步骤 4：储热子系统组成和功能认知（图文学习）

操作目的：掌握储热子系统组成及核心设备熔盐罐、熔盐泵的结构与工作原理。

操作过程：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，学生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。

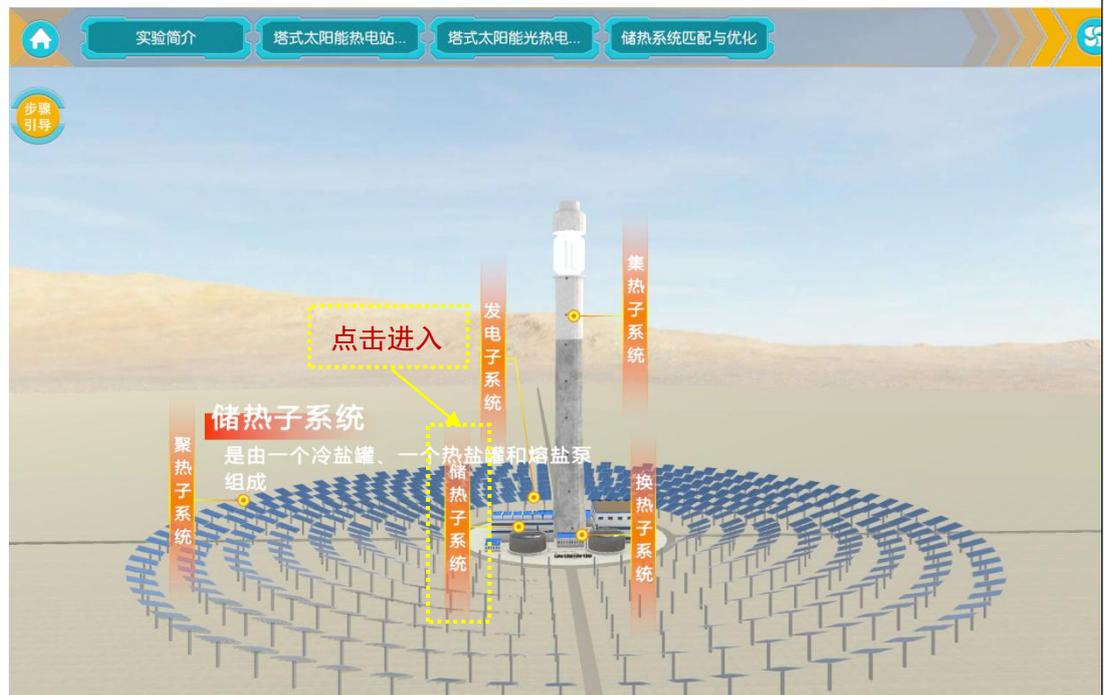


图 6a 塔式太阳能光热电站系统组成导航页面——储热子系统



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

操作结果：学生可了解到储热子系统的基本构成，近距离全方位观察储罐及熔盐泵外形，并能够深入了解储热罐壁面结构，了解其储存熔盐的保温工作原理。

步骤 5: 换热子系统组成和功能认知（图文学习）

操作目的：掌握换热子系统组成及核心设备换热器的结构与工作原理。

操作过程：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。

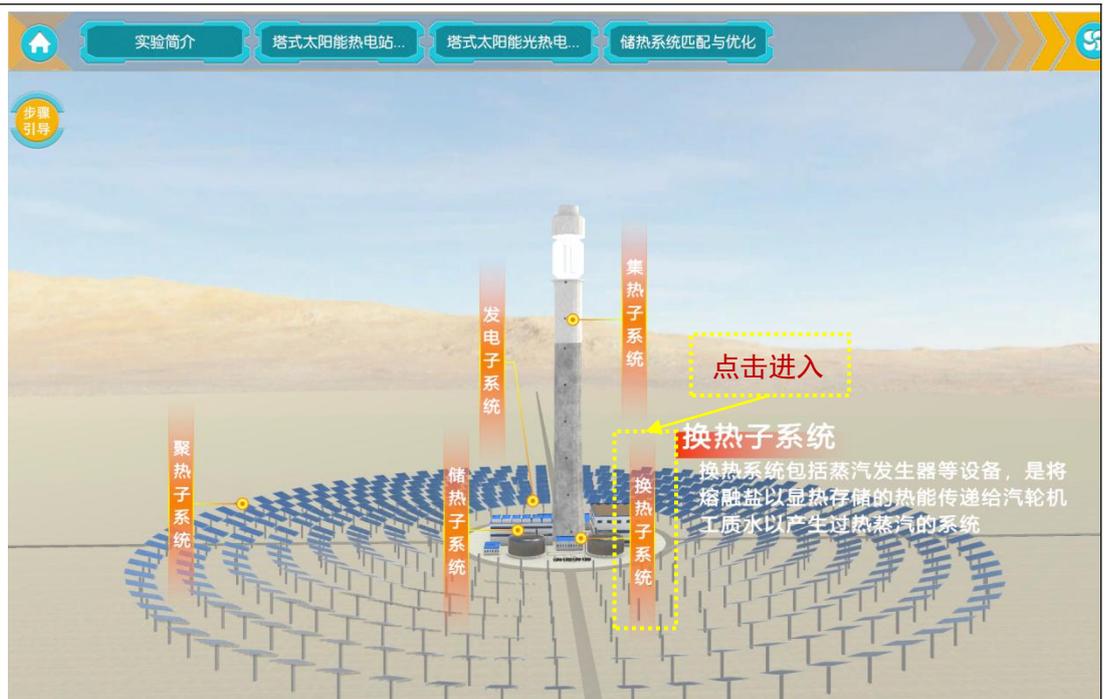


图 7a 塔式太阳能光热电站系统组成导航页面——换热子系统



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

操作结果：学生可了解到换热子系统的基本构成，近距离全方位观察换热器外形及其内部结构，并了解管壳式换热器的工作原理。

步骤 6：发电子系统组成和功能认知（图文学习）

操作目的：掌握发电子系统组成及核心设备换热器的结构与工作原理。

操作过程：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。

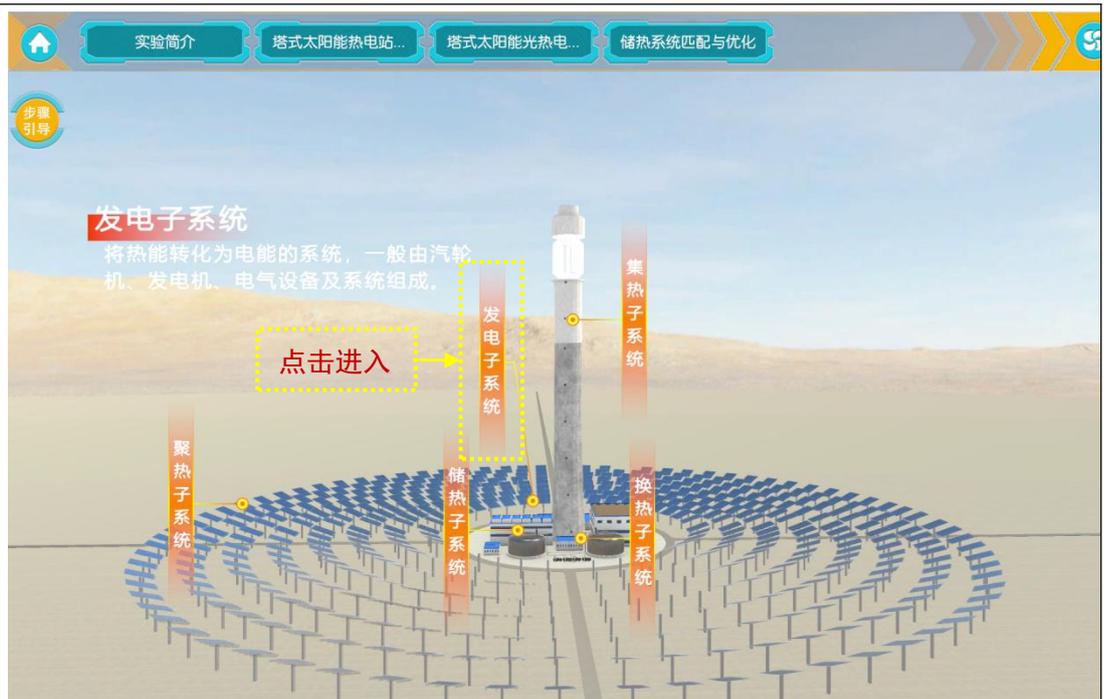


图 8a 塔式太阳能光热电站系统组成导航页面——发电子系统

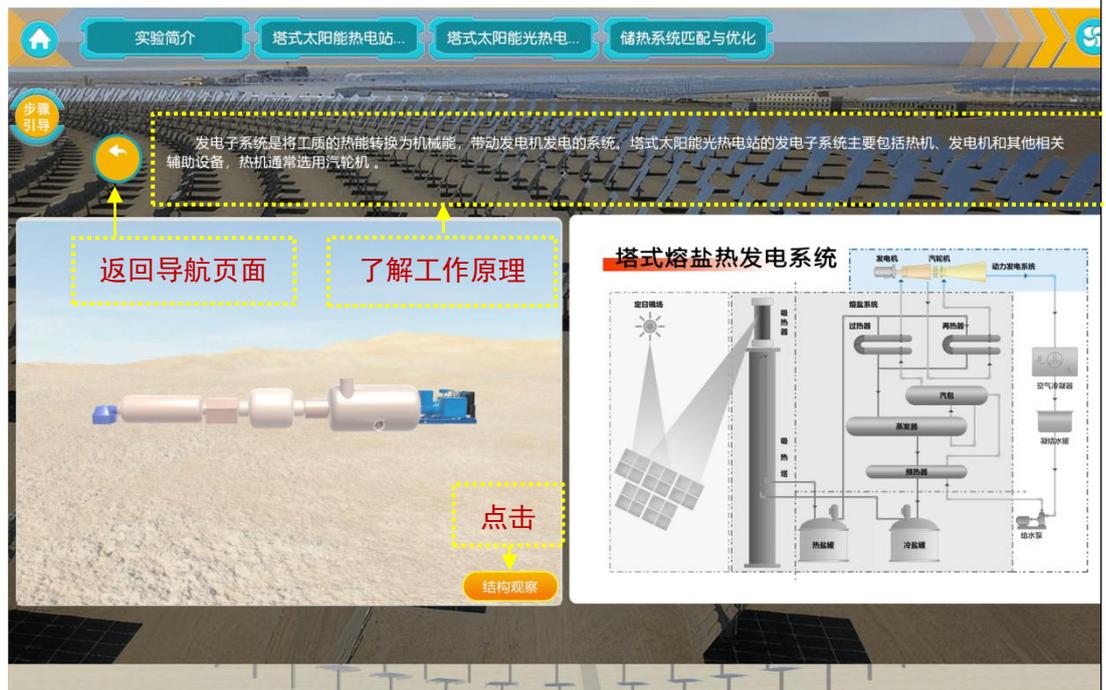


图 8b 塔式太阳能光热电站发电子系统——发电机组外观

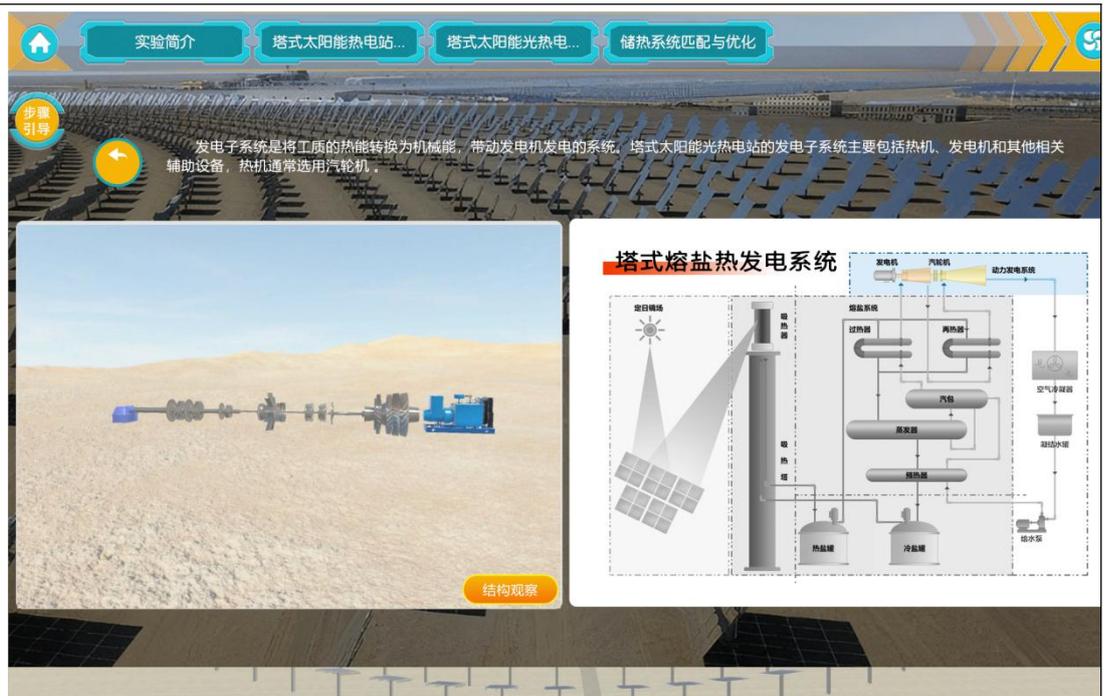


图 8c 塔式太阳能光热电站发电子系统——发电机组内部结构

操作结果：学生可了解到发电子系统的基本构成，近距离全方位观察发电机组外形及其内部结构。

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：

步骤 7：塔式太阳能光热电站初步选址（图文学习+方案选择）

操作目的：掌握影响塔式太阳能光热电站选址的主要因素。

操作过程：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

实验简介 塔式太阳能热电站... 塔式太阳能光热电... 储热系统匹配与优化

监控主屏

步骤引导 知识提示

空气质量

站址选择时，需要关注站址所在区域空气质量、沙尘、大气扩散条件和周边有无可能产生污染的项目。

气候数据是光热发电站利用天然光的重要因素，而气候数据包含水平总照度、漫射光照度、各方向垂直照度、天空亮度、云量、日照时间及大气透明度等内容，而最核心的内容是光照度和天空亮度分布，国际上通过国际采光年(DIMP)计划积累了部分城市(包括中国北京和重庆)的光气候观测数据，而国际照明委员会(CIE)也颁布涵盖多数天空类型的15类天空标准，这些研究工作促进了世界各地天然光的运用。

HJ 633-2012《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》规定:空气质量指数划分为0-50、51-100、101-150、151-200、201-300和大于300六档，分别对应于空气质量的六个级别:一级优，二级良，三级轻度污染，四级中度污染，五级重度污染，六级严重污染，指数越高，级别越高，说明污染越严重，对光照的影响也越明显。

据统计，年中度污染及以上(AQI大于150)天数大于100天的城市及城市周边区域，空气污染对光气候数据的影响较大，导致DNI会有明显下降，不适合作为光热发电站的选址。

全国空气质量指数(AQI)PM2.5实时地图
更新时间:2023-03-10 15:00

电站初步选址

目前规划建设—50MW的塔式太阳能光热电站，请根据具体参数，从中选择一个最优的站址。

单位换算: $3.6\text{MJ}/\text{m}^2 = 1\text{kWh}/\text{m}^2$

请在下列几个城市选择一个站址

城市名称 (经纬度)	年法向直接辐照量 DNR (kWh/m^2)	环境空气质量 指数AQI	年均 总云量	年均 风速 m/s	是否 具备水源
海南保亭 (经纬度: 110.47, 19.26)	1172	56	38%	2.5	具备
青海海东 (经纬度: 97.36, 37.37)	2685	82	26%	2.2	具备
甘肃敦煌 (经纬度: 94.66, 40.14)	2717	162	22%	1.4	不具备
江苏海陵 (经纬度: 118.80, 32.06)	780	34	45%	2.9	具备
黑龙江大庆 (经纬度: 125.10, 46.59)	2570	44	27%	5.6	具备

上一项 点击 下一项

图 9c 电站初步选址影响因素 (二) —— 空气质量

实验简介 塔式太阳能热电站... 塔式太阳能光热电... 储热系统匹配与优化

步骤引导

云状况

对于太阳能光热发电站而言，云遮天气不能忽视，有云天气是影响发电的主要因素，在有云天气下，为适应云的变化，吸热器频繁启停会使弃光率增加，直接影响发电量。云量的多少除和所在地区大的气候环境有关外，还与局部小气候有很大的关系，电站选址应尽量避免局部对流条件地区。

站址选择时要关注云量及局地小气候对太阳能光热发电站的影响，有条件时，站址厂址尽量远离山脉。

电站初步选址

目前规划建设—50MW的塔式太阳能光热电站，请根据具体参数，从中选择一个最优的站址。

单位换算: $3.6\text{MJ}/\text{m}^2 = 1\text{kWh}/\text{m}^2$

选址	年法向直接辐照量 DNR (kWh/m^2)	环境空气质量 指数AQI	年均 总云量	年均 风速 m/s	是否 具备水源
海南保亭 (经纬度: 110.47, 19.26)	1172	56	38%	2.5	具备
青海海东 (经纬度: 97.36, 37.37)	2685	82	26%	2.2	具备
甘肃敦煌 (经纬度: 94.66, 40.14)	2717	162	22%	1.4	不具备
江苏海陵 (经纬度: 118.80, 32.06)	780	34	45%	2.9	具备
黑龙江大庆 (经纬度: 125.10, 46.59)	2570	44	27%	5.6	具备

上一项 点击 下一项

图 9d 电站初步选址影响因素 (三) —— 云状况

实验简介 塔式太阳能热电站... 塔式太阳能热电站... 储热系统匹配与优化

步骤引导

风速

风速虽不是影响塔式太阳能热电站选址的主要因素，但在极端条件下的强风对电站某些部件强度设计有很大影响。塔式太阳能热电站定日镜工作时，需要以一定倾角跟踪太阳，当遇到较大的环境风速时，由风引起的作用在反射镜面的巨大扭矩可能阻挡定日镜的正常转动，定日镜传动装置需要能输出足够大的扭矩以克服风荷载阻力。在有风条件下，受环境风荷载的影响，定日镜反射镜面的角度随风荷载变化发生振动，导致投射到吸热器的光斑振荡，偏离了预期投射位置，降低了实际的跟踪精度。同时，定日镜强度设计有一定的范围，为保护装置，当风速超过限定值时，定日镜会自动退出工作。

塔式太阳能热电站宜选择在年均风速、最大风速相对较小的区域建设，否则风速过大，会导致定日镜场的支撑结构成本增加，减少电站的年运行时间，使电站平均效率下降。

电站初步选址

目前规划建设—50MW的塔式太阳能热电站，请根据具体参数，从中选择一个最优的站址。

单位换算：3.6MJ/m² = 1kWh/m²

选址	年法向直接辐射量 DNR (kWh/m ²)	环境空气质量指数AQI	年均总云量	年均风速m/s	是否具备水源
海南琼海 (纬度: 110.47, 19.26)	1172	56	38%	2.5	具备
青海格尔木 (纬度: 97.36, 37.37)	2685	82	26%	2.2	具备
甘肃敦煌 (纬度: 94.66, 40.14)	2717	162	22%	1.4	不具备
江苏南京 (纬度: 118.80, 32.05)	780	34	45%	2.9	具备
重庆江永 (纬度: 125.10, 46.55)	2570	44	27%	5.6	具备

上一项 点击 下一项

图 9e 电站初步选址影响因素（四）——风速

实验简介 塔式太阳能热电站... 塔式太阳能热电站... 储热系统匹配与优化

步骤引导

其他因素

除太阳能资源和气象条件因素外，太阳能热电站选址时还应考虑水源条件、光污染的影响以及场地条件等。

电站初步选址

目前规划建设—50MW的塔式太阳能热电站，请根据具体参数，从中选择一个最优的站址。

单位换算：3.6MJ/m² = 1kWh/m²

选址	年法向直接辐射量 DNR (kWh/m ²)	环境空气质量指数AQI	年均总云量	年均风速m/s	是否具备水源
海南琼海 (纬度: 110.47, 19.26)	1172	56	38%	2.5	具备
青海格尔木 (纬度: 97.36, 37.37)	2685	82	26%	2.2	具备
甘肃敦煌 (纬度: 94.66, 40.14)	2717	162	22%	1.4	不具备
江苏南京 (纬度: 118.80, 32.05)	780	34	45%	2.9	具备
重庆江永 (纬度: 125.10, 46.55)	2570	44	27%	5.6	具备

上一项 点击 完成

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

操作结果：学生可以了解到电站选址的主要影响因素，根据各影响因素的制约条件完成电站初步选址。

步骤 8: 吸收器额定热输出功率测算（数据采集+设计计算）

操作目的：掌握吸收器额定热输出功率的计算方法。

操作过程：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

操作结果: 学生能够通过通过在仿真监控室调取运行参数, 简要了解电站运行控制环境, 并通过参数表格知悉温度对于熔融盐比热容的影响, 通过公式计算, 理解并掌握吸收器额定热输出功率的原理及计算方法。

步骤 9: 吸收塔高度设计 (设计计算)

操作目的: 掌握吸收塔高度的设计计算方法。

操作过程: 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

操作结果: 学生能够通过计算, 理解并掌握吸收塔高度设计的原理及计算

方法，了解主要影响因素，通过数据图了解工程中吸收塔经济高度范围，并确认自己设计的吸收塔高度是否符合要求。

步骤 10: 太阳法向直接辐照度测定（虚拟测量）

操作目的：掌握太阳法向直接辐照度测定方法。

操作过程：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）。

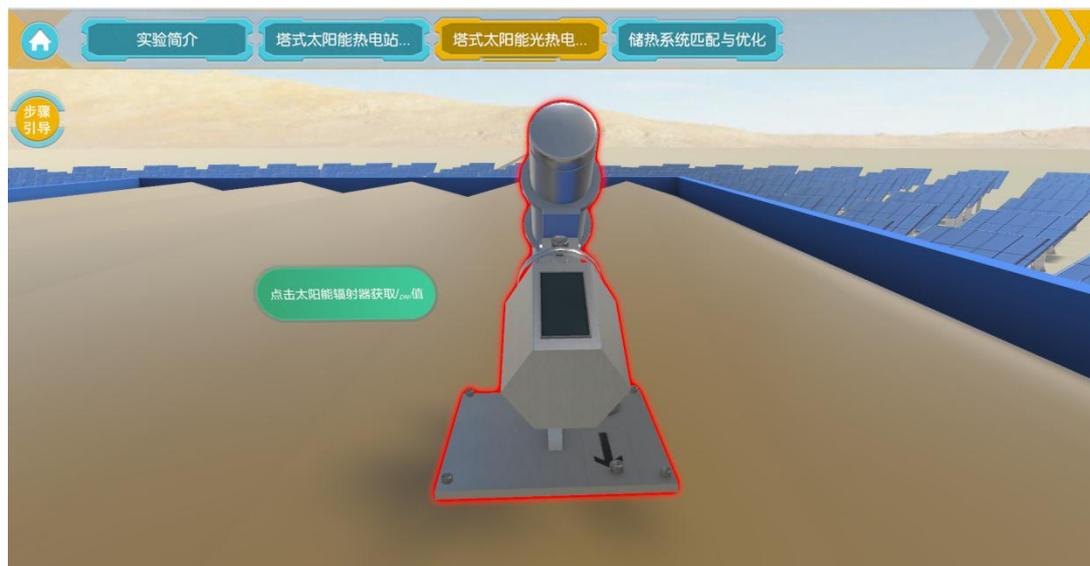


图 12 太阳法向直接辐照度测定

操作结果：通过虚拟测量，学生可以明确塔式太阳能光热电站的设计基础数据是太阳法向直接辐照度，并简单认识太阳直接辐射的测量仪器的结构，获得选址地的太阳直接辐射度数据，用于下一步镜场设计计算。

步骤 11: 定日镜场总面积估算（设计计算）

操作目的：掌握定日镜场总面积的估算方法。

操作过程：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

操作结果: 通过计算, 学生可以明确镜场总面积计算需要的数据及主要影响因素, 可以明确区分镜场效率、光热转换效率和热电转换效率。

步骤 12: 定日镜型号选择及数量计算 (方案选择+设计计算)

操作目的: 掌握定日镜面积选择依据及数量计算方法。

操作过程: 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)。

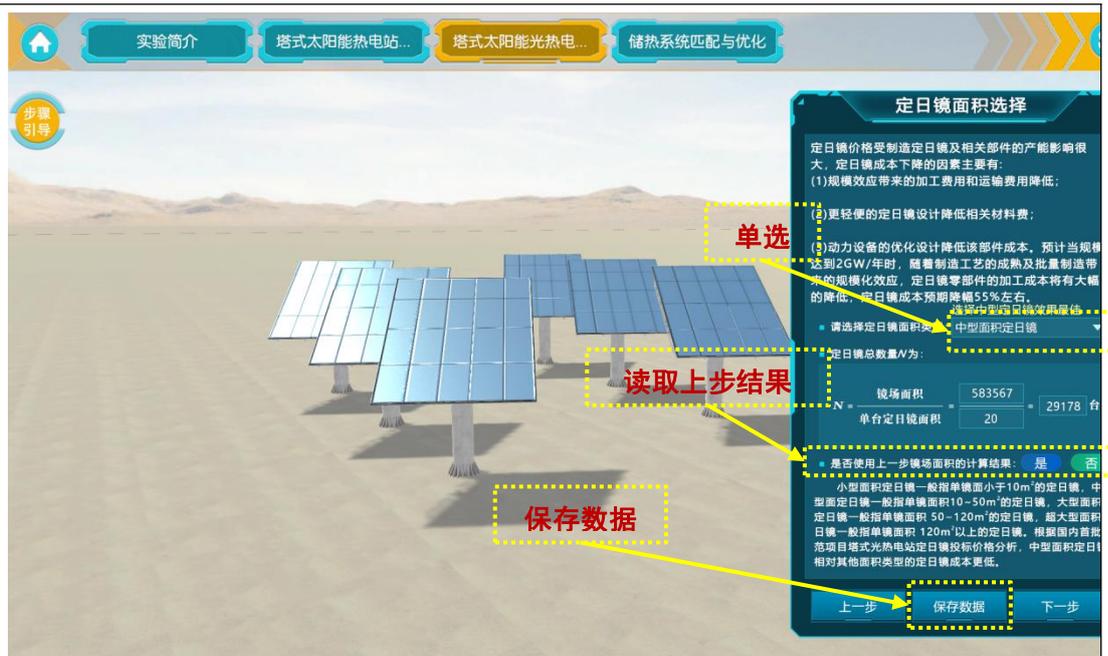


图 14 定日镜面积类型选择

操作结果：学生可以掌握不同类型定日镜的面积范围，了解影响定日镜成本的主要因素，并从技术经济的角度选择合适的定日镜，根据镜场所需总面积和单台定日镜面积，确定定日镜数量。

步骤 13: 定日镜场辐射交错排列布置（设计计算+虚拟调节）

操作目的：掌握辐射交错式定日镜场布置基本方法。

操作过程：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

操作结果: 学生可以掌握辐射交错式镜场布置方式的核心要素, 掌握定日镜间距的计算方法, 并可体验定日镜调节, 趣味性的互动环节可以提高学生的学习兴趣。

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：

步骤 14：镜场余弦效率比较（图文学习）

操作目的：明确余弦效率随纬度的依变关系。

操作过程：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）。

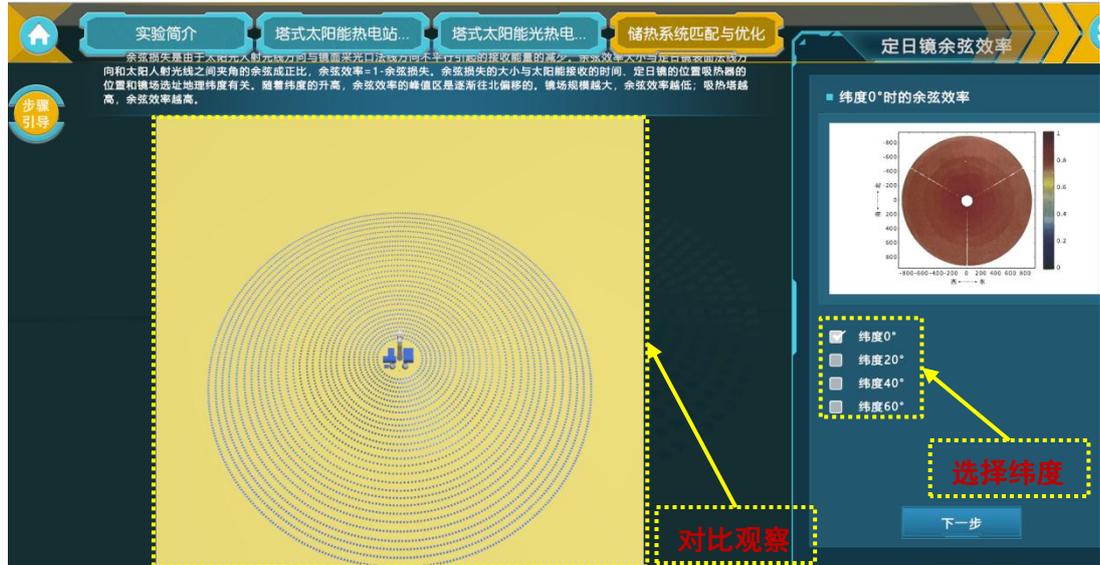


图 16a 镜场布置及余弦效率随纬度的变化——北纬 0° 地区

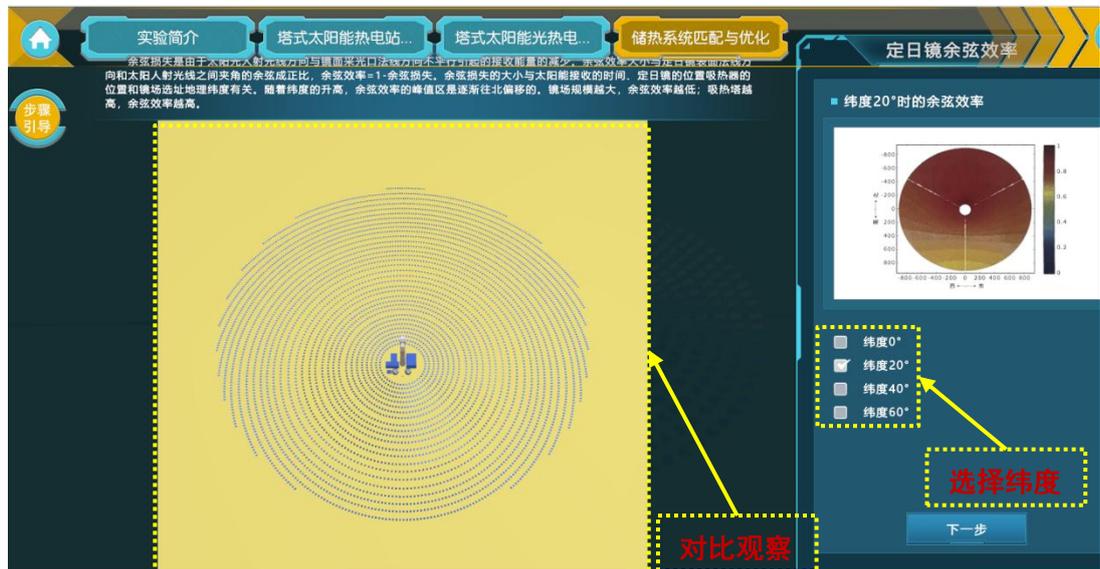


图 16b 镜场布置及余弦效率随纬度的变化——北纬 20° 地区

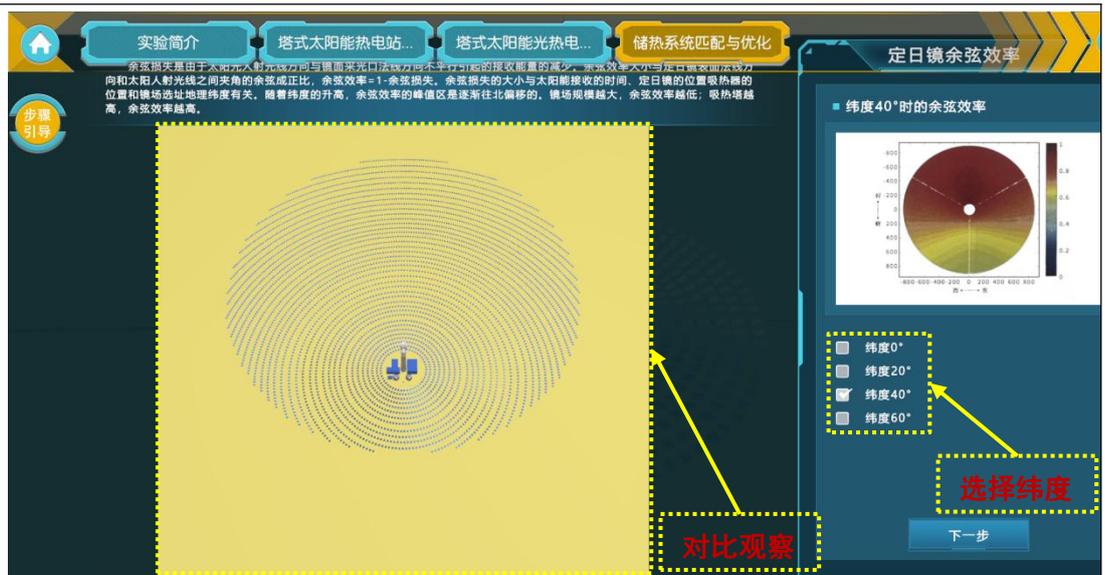


图 16c 镜场布置及余弦效率随纬度的变化——北纬 40° 地区

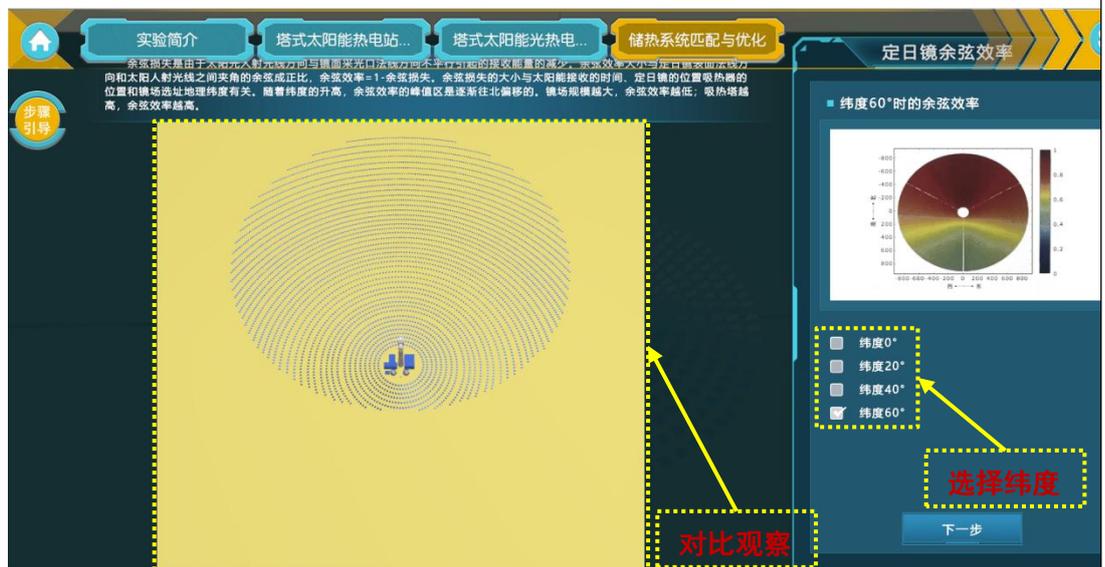


图 16d 镜场布置及余弦效率随纬度的变化——北纬 60° 地区

操作结果：学生可以明确余弦效率随纬度的依变关系，并可以理解北半球随纬度变化镜场偏移布置的原因。

步骤 15: 镜场效率计算及最终选址（方案选择）

操作目的：掌握镜场效率的计算方法与影响因素。

操作过程：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）。

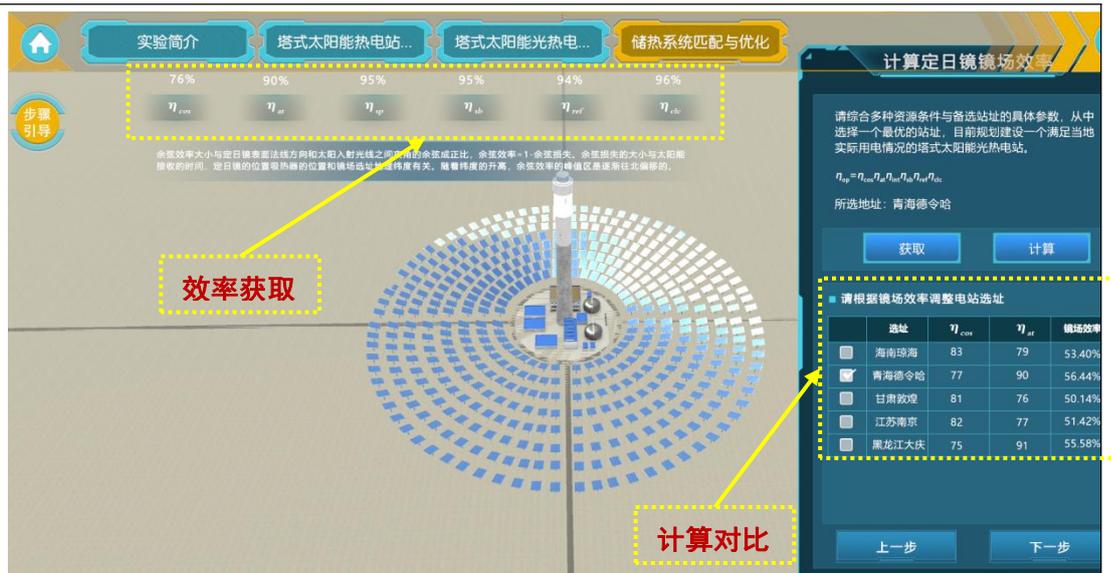


图 17 镜场效率计算及最终选址

操作结果: 学生可以明确镜场效率的影响因素, 并能够根据计算结果优选出项目最终选址地(镜场效率最高)。

步骤 16: 储热系统优化设计(图文学习+优化探究)

操作目的: 掌握以 LCOE 最低为目标函数的储热系统优化设计方法。

操作过程: 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

操作结果：学生可以 LCOE（度电成本）的影响因素，并能够根据图示结果优选出太阳倍数和储热时长的最佳组合。

步骤 17: 熔盐罐液位测量与可循环熔融盐质量预测(虚拟测量+设计计算)

操作目的：掌握储热系统可循环熔盐量计算方法。

操作过程：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）。

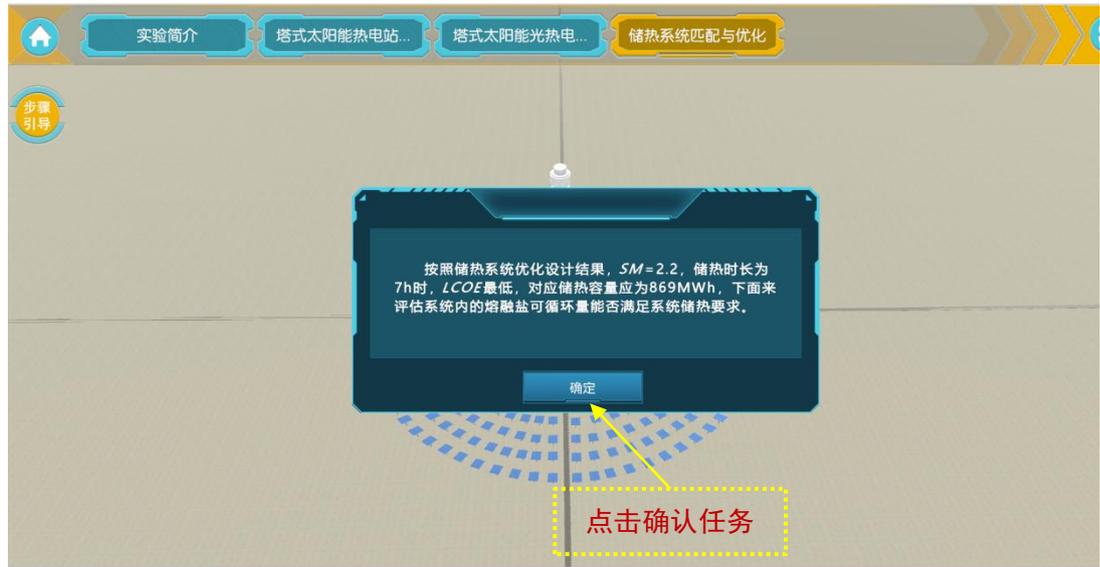
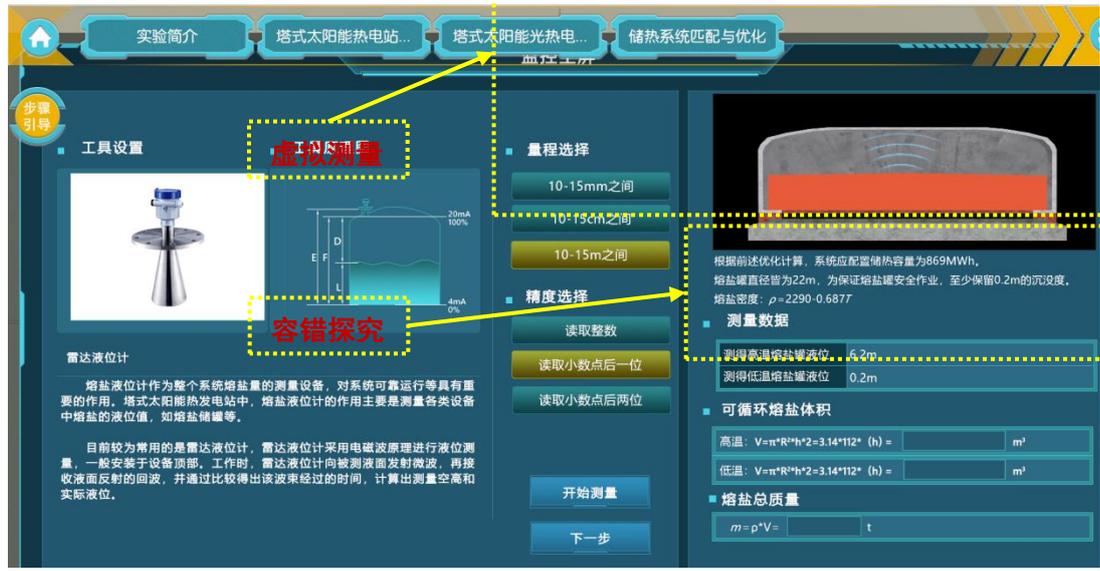


图 19a 最大有效储热容量评估任务确认

图 19b 熔盐罐液位测量与可循环熔盐量计算

操作结果：学生可以了解储热罐液位测量仪器的工作原理，明确其量程及精度选择需求，了解储热罐液面的最低要求（熔盐



泵淹没度)。了解熔融盐密度随温度的依变关系,并准确预测系统内可循环的熔融盐质量。

步骤 18: 最大储热量计算 (计算评价)

操作目的: 掌握系统最大有效储热容量的评估方法。

操作过程: 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)。

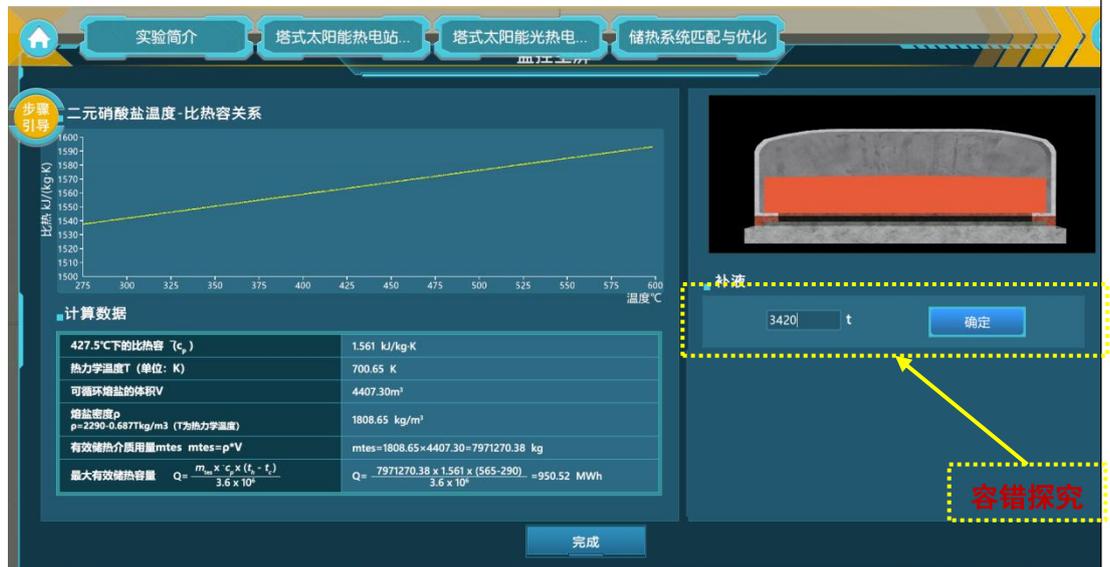


图 20 最大储热量及补液量计算

操作结果: 学生可以掌握系统最大储热量的计算方法,并能够根据计算结果判断当前可循环熔融盐质量是否满足设计要求。

	教师活动与设计意图	学生活动	
	1、检查学生操作情况; 2、为有需要的学生答疑。	1、自主操作实验; 2、完成各交互性操作步骤。	
总结 1 分钟	总结实验,要求学生课后整理实验报告。		PPT 板书
	教师活动与设计意图	学生活动	
	1、对本次实验的内容框架进行梳理,多媒体列出知识点,板书体现知识框架; 2、巩固课堂学习效果,帮助学生对所学的知识	1、聆听总结,回顾实验主要内容; 2、明确三个实验环节的关	

	点及工程应用有总体把握，形成闭环。	系，深入理解含义。	
--	-------------------	-----------	--

预习任务与课后作业

【预习】仔细阅读实验指导书，了解实验目的、原理及步骤。

【拓展】尝试用 Matlab 建模并优化 LCOE。

实验结果及评价

在不同实验条件和操作下，学生可能获得不同的实验结果与结论。其中环节一与环节二主要是不同操作导致不同得分；而环节三则有不同实验条件及不同操作下的不同实验结果。

具体如下：

环节一：塔式太阳能光热电站基本组成认知

学生根据步骤引导，逐个点击并观察“电站整体构成”、“聚光子系统”、“集热子系统”、“储热子系统”以及“换热子系统”的主要结构和相关设备，并结合针对功能的详细说明开展对比分析和认知学习。本环节主要根据学生的点击操作计算分数。学生必须按照步骤引导和任务要求逐个点击观察对象，方能获取全部分数，如有遗漏将扣除相应分数。因此，学生对塔式太阳能光热电站各个基本组成的点击学习情况决定了本环节的实验成绩。

环节二：塔式太阳能热电站设计集成

本环节为学生提供了塔式太阳能光热电站设计的基本框架，学生系统初步选址可能存在差异，但在第三环节可以修正。定日镜的选择和调节可能存在操作差异，但系统会提示学生修正。在计算过程中，系统提供三次重复实验机会且计算误差允许在 5% 范围内，操作错误后允许重做，但获取的分值随着实验次数的增加而递减。

环节三：电站储热系统匹配与优化

本环节中，学生首先需要了解电站储热系统匹配与优化的基本思想。按照电站备用选址的基本气象资料，结合不同纬度地区镜场布置开展案例分析，然后根据电站需求选配太阳倍数和储热时间，计算度电成本。系统会根据学生的计算结果提示引导学生重新开展储热系统匹配与优化。学生通过改变太阳倍数和储热时间，对比分析度电成本的变化趋势，寻找最优方案。不同学生找到的最低电价有可能不同，按照与系统最低电价的偏差，采用函数赋分。

在液位测量步骤，系统会随机生成高低温熔盐罐的液位，不同学生，数据不同；同一位学生，不同次实验或同次实验不同次操作均不相同，根据液位计算的熔盐体积和质量也均不相同，相当于多人多题或多次多题。

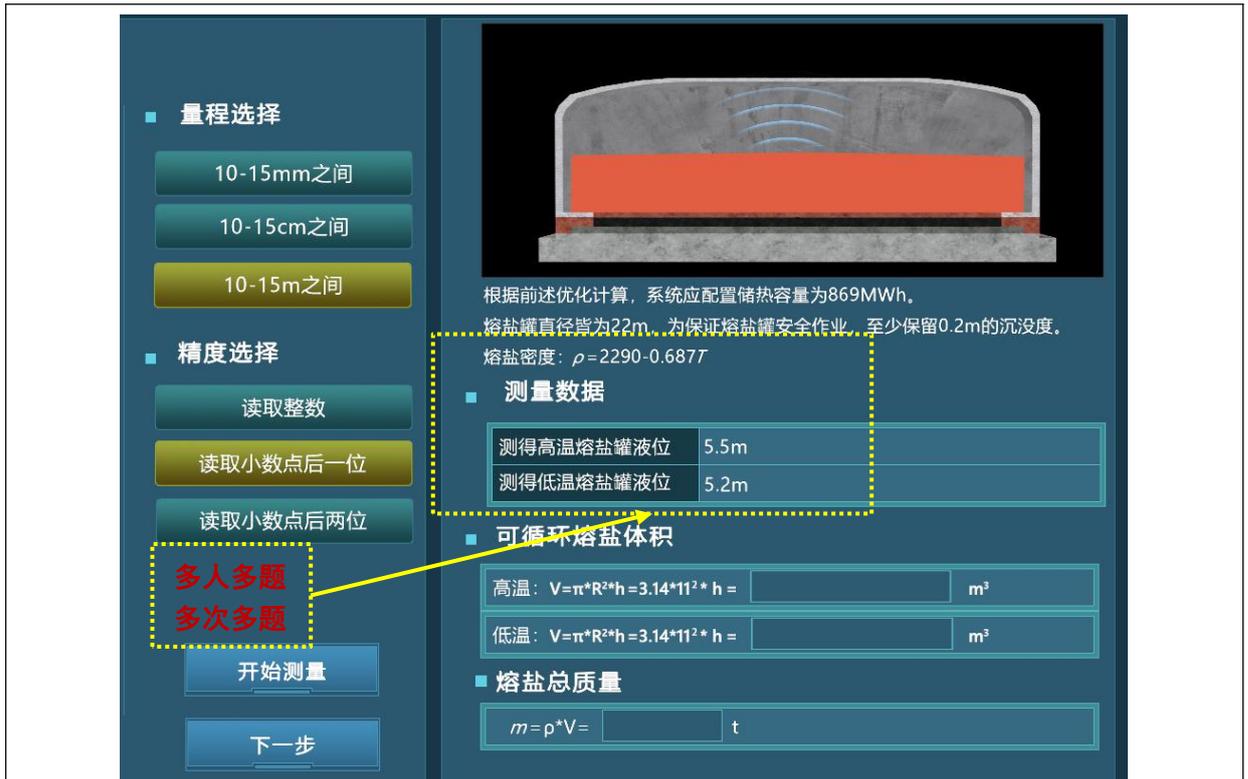


图 21 熔盐罐液位测量生成随机数据

在系统补液量计算步骤，系统会根据学生填写的补液量判断结果，并给出提示：

情况一：当补液量不足时，会提示“警告！警告！设计补液量不足，系统无法正常运行”；

情况二：当补液量正确时，会提示“设计补液量足够，系统可以正常运行”；

学生可以根据系统提示修改计算补液量。



图 22a 系统补液量不足时的提示界面



图 22b 系统补液量充足时的提示界面

本环节的计算为学生提供了三次操作机会，操作错误后允许重做，获取的分值随着实验次数的增加而递减，其中最低电价和系统补液量采用函数赋分，学生计算结果偏差不同导致得分差异。因此，学生的操作情况决定了本环节实验成绩是否理想。

本实验系统会完整记录学生的实验过程，及其在每个实验环节产生的实验结果，并根据学生在3个实验环节中的完成情况，自动依据成绩评价模型对各环节操作及结果进行单独打分。按照20%、30%和50%的权重计算学生的实验总成绩，合并生成最终的实验报告。学生可查看实验报告，通过总结提高综合分析和解决问题的能力。每个环节学生完成实验的结果是本实验成绩评定的主要依据。

实验环节	教学目的	子环节	知识点	考核点/分值	教学目的
电站系统认知	掌握塔式太阳能光热电站系统构成及工作原理	塔式光热电站	1、电站总体构成	1个/+2分	基础认知
		聚光子系统	2、聚光子系统组成	3个/+3分	
		集热子系统	3、集热子系统组成	7个/+7分	
		蓄热子系统	4、储热子系统组成	3个/+3分	
		换热子系统	5、换热子系统组成	3个/+3分	
		发电子系统	6、发电子系统组成	3个/+2分	
20分					
电站设计集成	构筑塔式太阳能热电站设计平台	电站初步选址	7、太阳能光热电站选址影响因素	5个/+5分	分析设计
		吸收塔高度设计	8、吸收塔高度设计计算	3个/+7分	
		镜场设计	9、镜场面积计算和定日镜布置调节	6个/+18分	
30分					
储热系统配置优化	提升联系实际解决实际问题的能力	镜场效率预测	10、镜场效率的影响因素与预测方法	4个/+5分	应用探索
		储热系统优化设计	11、基于太阳倍数+储热时间的度电成本优化	2个/+15分	
		最大储热容量评估	12、最大有效储热容量评估与补液量预测	8个/+30分	
50分					

图 23 实验原理及成绩评价模型

实验操作评分权重分配

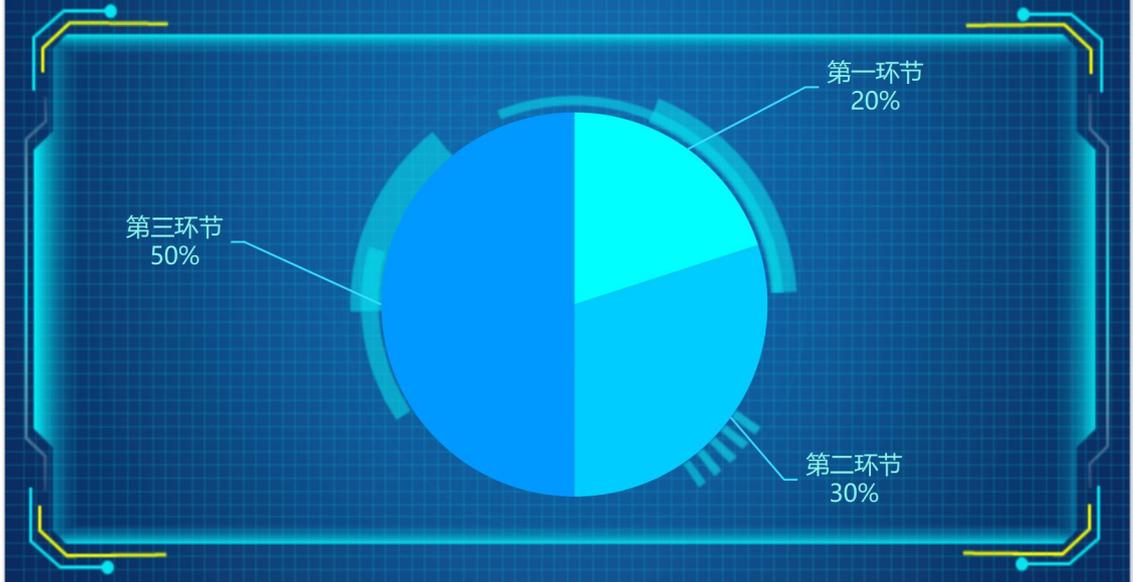


图 24 实验操作评分权重分配图示