



基于虚拟现实的变电站实验教学 平台设计与应用

廖晓辉, 邹 许, 蔡志龙, 陈 怡

(郑州大学 电气与信息工程学院, 郑州 450001)

摘要: 传统变电站仿真系统的不完善导致变电站实践教学一直存在着局限性, 该文基于虚拟现实技术开发了新型的变电站虚拟仿真实验教学平台。构建的虚拟仿真实验环境以国内 220 kV 变电站为基础, 优化了系统的设计架构。为了让学生能更好地理解掌握变电站相关知识, 并将理论知识和实践操作结合起来, 加入了理论知识解答、故障模拟及处理等功能。实验结果表明, 相较于传统的虚拟教学系统, 操作更加便利, 沉浸感更强, 在培养学生的创新思维能力方面具有较大的优势。

关键词: 变电站; 虚拟现实; 仿真实验; Unity3D

中图分类号: G642.0

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230028

Design and Application of the Substation Experimental Teaching Platform Based on the Virtual Reality

LIAO Xiaohui, ZOU Xu, CAI Zhilong, CHEN Yi

(School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The imperfection of the traditional substation simulation system has led to the limitations of substation practice teaching, and a new substation virtual simulation experiment teaching platform is developed based on the virtual reality technology. The virtual simulation experimental environment is based on the domestic 220 kV substation, and the design architecture of the system is optimized. In order to enable students to better understand and master the relevant knowledge of substation, and combine theoretical knowledge with practical operation, the functions of theoretical knowledge answering, fault simulation and processing are added. Experimental results show that compared with the traditional virtual teaching system, the operation is more convenient and the sense of immersion is stronger, which has great advantages in cultivating students' innovative thinking ability.

Key words: substations; virtual reality; simulation experiments; Unity3D

电力工业规模的不断扩大, 使变电站运行维护复杂化, 因此必须保证相关专业学生能力的提高。传统校外实习往往具有因电网运行特殊性而造成的诸多局限, 难以得到良好的实习效果。由于电力资源涉及高压高危环境, 且电力资源相关设备异常贵重, 导致无法通过运行中的设备进行模拟实验, 更不能人为设置故障来进行实验训练^[1-3]。同时传统变电站的虚拟仿真系统主要通过物理仿真和数字仿真结合, 需要专用设备来实现, 尤其是变电站电气倒闸操作复杂, 需要用户花较

长时间掌握操作的方法和流程, 存在现场感不强、交互体验效果不佳的问题^[4-6]。因此探索研究更加完善的变电站虚拟仿真环境具有重要意义。

构建虚拟仿真变电站教学系统工作量庞大, 包括大量的模型搭建、环境渲染、交互设计、脚本制作等, 同时还要保证系统的流畅运行, 因此常见的虚拟变电站视觉效果差, 功能单一, 无法达到更好的教学效果^[7-8]。文献 [9] 应用 Virtools 开发了地下变电站运行仿真系统, 这套系统缺乏对一次设备原理的介绍。文献 [10] 应用 Unity3D 开

收稿日期: 2023-01-13; 修回日期: 2023-12-02

基金项目: 河南省科技攻关项目 (222102220053); 郑州大学 2022 年度校级教育教学改革研究与实践项目 (2022ZZUJG042)。

作者简介: 廖晓辉(1972-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事电能质量检测与评估、图像处理与虚拟现实技术的研究。E-mail: Liaoxiaohui0001@zzu.edu.cn

发了 10 kV 变电仿真教学系统，但是并没有对设备实操做出介绍。文献 [11] 开发了高铁牵引变电站巡视及检修虚拟仿真系统，但是该系统没有系统的理论知识讲解及对学员的考核功能。为解决以上问题，本文开发了沉浸式虚拟变电站实验教学平台，下面将介绍该平台的设计思路、主要教学模块及考核体系等。

1 设计理念和创新举措

1.1 设计理念

最大限度地提高核心要素的仿真度，以智能变电站场景为参照，通过虚拟现实仿真技术构建完整的 220 kV 变电站虚拟环境，通过交互式文本语音介绍等学习方式来进行教学，提高实验教学效率，让学生可以选择自主学习。通过实验熟悉智能变电站的真实运行场景，理解并掌握变电站基本的操作及故障处理方式等，培养学生的创新思维和创新设计能力。

1.2 创新举措

采用数字化、信息化、多媒体、虚拟现实、网络通信等现代信息技术，以变电站一次设备为仿真主体，将一次设备结构和工作原理进行三维展示。采用理论和实践相结合的教学方法，在每个实验模块中设计答题环节来检测学生的学习效率。利用文字讲解、三维动画、声光特效等多种方式，以变压器油温、母线电压、潮流监测等实时运行数据为基础，模拟实时运行数据刷新，充分展示设备损坏、短路、起火、雷击等高仿真度变电站场景。

2 虚拟仿真变电站的搭建

2.1 虚拟变电站系统的总体架构

总体层次结构共分为 5 层，由下至上分别为数据层、支撑层、通用服务层、仿真层和应用层，系统的总体架构如图 1 所示。每一层都为其上层提供服务，5 层架构共同配合，支撑、优化系统中多级模块的运行，直到完成具体虚拟实验教学环境的构建^[6]。

仿真层主要针对该系统进行相应的设备建模、实验场景构建、虚拟仪器开发、提供通用的仿真模型，最后为上层提供实验结果数据的格式化输出。场景搭建过程中采用了多种模型优化技术，以降低整个仿真系统模型的冗杂性，提高系

统的流畅度。该框架的应用层具有良好的扩展性，实验教师可根据教学需要，利用服务层提供的各种工具和仿真层提供的相应的器材模型，设计各种典型实验实例，最后面向学生开展实验教学应用。

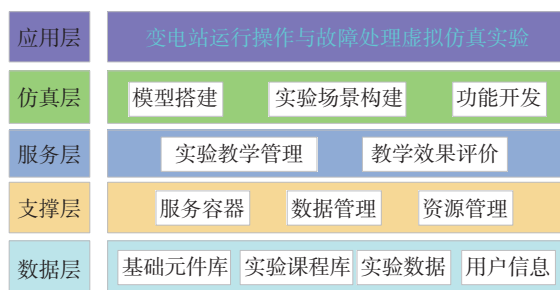


图 1 系统总体框架图

2.2 虚拟仿真变电站的开发流程

实验项目在需求分析、实地考察的基础上，利用 3D 仿真、动画制作、Unity 开发等技术设计了变电站运行操作与故障处理虚拟仿真实验系统。如图 2 所示为系统开发流程图，系统的方案设计包括三维模型的搭建、虚拟场景的开发、动画模拟设计、GUI 设计、脚本编辑和交互设计。共为系统设计了 6 种功能，包括设备认知学习、漫游巡检、操作实践、故障仿真、注册登录和人机交互。

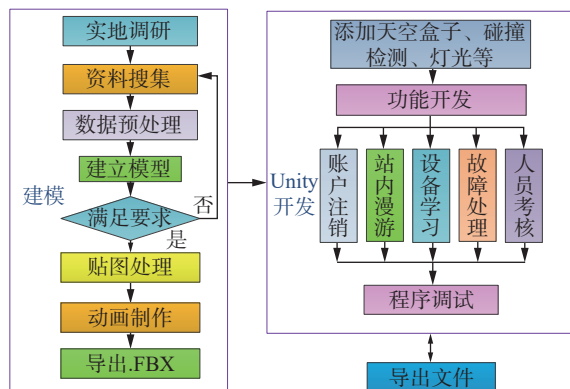


图 2 系统开发流程图

3 主要教学模块展示

3.1 设备认知

在设备认知模块学生可以详细学习变电站主要设备的结构、工作原理、操作方法等。设备认知包括主变压器、断路器、隔离开关等设备的认知学习。以变压器认知学习为例，在设备上移动鼠标即可显示变压器中当前位置的结构名称及作

用介绍文字说明,如变压器绕组、油枕、油箱、冷却装置等,如图3所示。点击“设备原理”可以查看变压器的工作原理动画演示。在主变压器的绕组连接方式及排列顺序教学中,主要讲解了绕组Y、 Δ 连接方式,并加入高、中、低压绕组排列练习环节来进行知识的巩固。



图3 变压器结构学习

3.2 漫游巡检

变电站的漫游巡检设置了3种方式,分别为自动漫游、手动漫游和空中漫游。实验中,学生可查看变电站整体情况与绝缘子状况,检查主要设备运行参数与潮流分布,如变压器油温、220 kV及66 kV母线电压、各出线、相电流、有功功率、无功功率等。所有运行数据定时刷新变压器运行参数的巡检如图4所示。



图4 变压器运行参数巡检

3.3 电气倒闸操作

点击电气主接线下的【倒闸操作】菜单,以220 kV出线仿试1线由运行转检修为例,弹出该回出线主接线图,主接线图起到一个导航图的作用。

进入操作界面,学生可在主接线图中找到相应的设备并按照提示的流程进行操作,如图5所示。隔离开关(刀闸)动静触头的分合动作清晰可见,拉开上刀闸时,伴有声光特效,模拟实际操

作中的电火花现象,可以训练学生倒闸操作技能,消除陌生感和恐惧感。

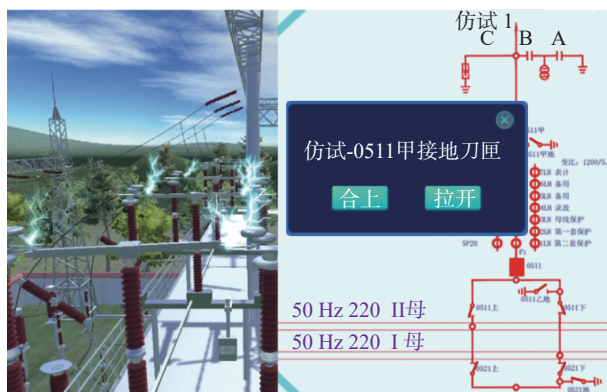


图5 倒闸操作

3.4 故障处理

1) 常见静态故障模拟及处理

学生在变电站虚拟场景内根据系统提示找到故障点,插上故障标识,并汇报上级处理排除故障。系统中设置的静态故障有绝缘瓷瓶破裂故障、机构箱门未锁故障、接地线锈蚀故障和变压器漏油故障。

2) 变压器起火故障

在变电站虚拟场景中巡检发现变压器起火故障位置,系统会自动提示学生具体的处理步骤,如图6所示,再经过后续的知识作答环节将培养学生处理此故障的能力。

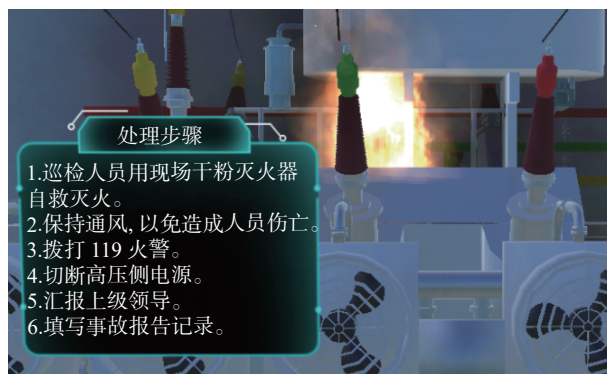


图6 变压器起火故障

3) 单相接地故障处理

以220 kV出线仿试1线A相接地短路故障为例,点击仿试1出线近端悬挂的带有“单相接地短路”字样标识牌进行故障设置。学生可以根据提示进行详细的检查并汇报,检查故障状态下三相相电压波形如图7所示,与正常状态时进行对比。待排除故障后摘取标识牌,按倒闸操作流程恢复送电。

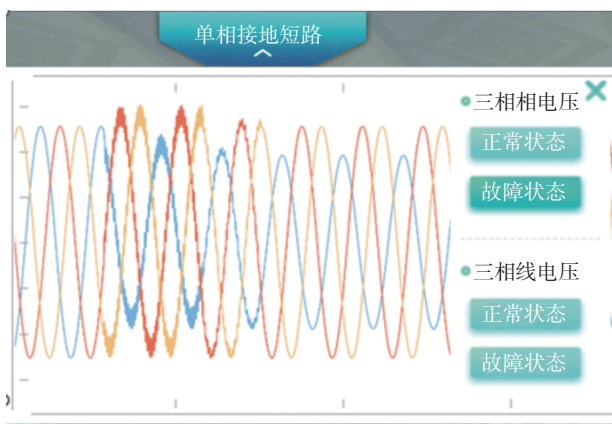


图 7 故障状态下三相相电压波形

4) 变电站直击雷过电压及其防护

在模拟场景中雷直接击中避雷针，再通过光影音效模拟雷击效果，学生可观察直击雷过电压产生过程及特性。实验中学生可以在不同幅值的直击雷下调整避雷针接地电阻，分析其对直击雷过电压的影响。选择一个雷电流幅值和接地电阻，会出现不同塔顶塔基曲线和相应数值显示，通过观察波形变化趋势，总结参数调整对实验结果的影响。

5) 变电站雷电侵入波过电压及其防护

雷电侵入波沿线路杆塔侵入站内各电气设备到达变压器，在各电气设备上产生过电压。系统模拟了雷电侵入波过电压产生过程。在系统中可以调整避雷器位置、残压参数、雷击杆塔位置、雷击#1号杆塔的接地电阻，分别分析其对雷电侵入波过电压的影响。在分析完各种参数的改变对雷电侵入波过电压的影响后，系统将展示相应的防护措施。

4 变电站虚拟仿真实验考核

4.1 对学生的考核要求

1) 在进行实验前，应仔细阅读变电站虚拟仿真实验系统中相关实验教程、实验指南和资料，了解实验的目的、实验内容与步骤，根据实验内容预习相关基础理论知识，解答相关练习题。

2) 熟悉变电站虚拟仿真教学系统中的一次设备布局，在教师教案的指导下及实验引导学习模块的练习下，根据实验项目和要求，独立地进行实验；在实验系统中，根据教师所设置的实验操作指南进行实验操作与研讨。

3) 深入理解和掌握变电站主要设备的基本工作原理，根据倒闸操作和故障处理学习变电站基本操作步骤。

4) 独立地进行内容学习与实验操作，实验完成后应根据实验过程，分析实验现象及结果，撰写并提交完整的实验报告。

实验教学实施流程图如图 8 所示。

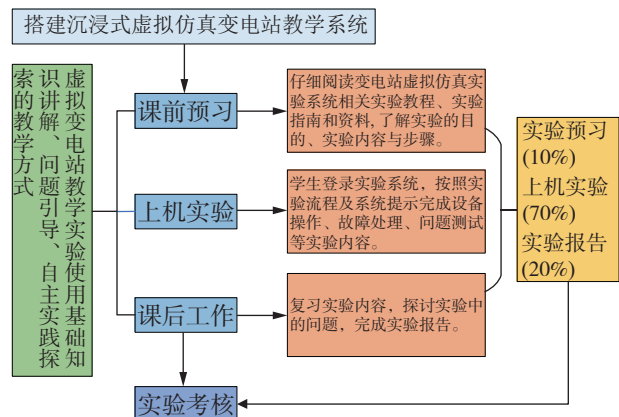


图 8 实验教学实施流程图

4.2 实验成绩构成

考核成绩由预习(10%)、实验操作(70%)、实验报告(20%)组成。

1) 预习

在预习阶段，学生通过基础知识的学习，实验系统根据所设置的练习题解答的正确性进行评分(满分基础上扣分)，考查学生对相关知识的掌握程度，教师在线答疑，实验系统综合评定预习成绩。

2) 实验操作

系统记录学生的每步实验操作步骤，实验操作成绩通过学生在实验过程中操作正确性判定的基础上，由实验系统进行评定。部分评定结果如图 9 所示。

		考核结果	
	项目	分值	实际得分
故障处理	静态故障排除	5	3
	典型故障处理	10	5
	雷击过电压	9	5
	侵入波过电压	5	2
误操作	错误操作分析	7	5
时间	处理时长	10	10
考核成绩:		71	

图 9 实验评定结果

3) 实验报告

从学生实验报告的完整性、正确性、创新性等方面,由教师审阅实验报告的总体情况进行成绩判定。

5 实验教学效果分析

5.1 虚拟实验教学成果显著

设计的沉浸式虚拟仿真变电站教学实验平台已对有相关实验学习需求的师生开放,疫情期间助力实验教学停课不停教、不停学^[12]。调查发现,超过90%的学生表示实验内容及上机实验操作设计合理,实验过程中沉浸感强,设备模型还原度高,系统中设备和功能比较齐全。通过对脚本的优化,实验过程中的交互场景运行流畅,锻炼了学生操作具体设备的能力^[13-14]。实验采用的“理论讲解+知识解答+设备操作+故障处理+成绩自动评定”教学考核体系调动了学生的积极性和参与度,丰富的动画效果和故障仿真效果为上机实验增加了趣味性,激发了学生的创新设计思维。

5.2 实验教学问题分析

实验系统中理论教学、知识考核和实验教学部分内容丰富,但这几部分内容的最佳比例还需要结合学生的反馈意见进行探索和设置。仿真教学系统主要针对一次设备,在后续开发过程中,会逐渐添加变电站二次部分仿真,进一步完善变电站的虚拟仿真实验系统,丰富实验案例模型库,还可继续仿真更高电压等级的变电站,并对虚拟仿真实验教学平台的硬件系统和设备进行定期维护和维修,对软件系统进行升级。

6 结束语

虚拟现实技术已大范围地应用于实验教学,利用虚拟仿真技术搭建的沉浸式变电站模拟场景带来了真实的现场感,构建了一个完整的仿真实验环境,逼真地展现了变电站的一些常见故障和雷击防护的处理过程,激发了学生的学习热情和创新思维,提升了教学效率,是传统课堂教学方式和传统虚拟实验场景的延伸,拓展了传统的教学和实践方法^[15-16]。

在虚拟仿真实验教学的探索中要遵循教育部制定的《虚拟仿真实验教学课程建设和共享应用规范》,以培养学生的能力为核心,充分发挥VR(virtual reality)和AR(augmented reality)技术的

优势,对虚拟仿真场景进行持续的开发和完善,同时需要对软件系统不断地维护、优化和升级,丰富教学系统的功能^[17],以达到更好的实验教学效果。

参考文献

- [1] 杨静,胡秋琦,吴屏,等.电类实验教学中的线上线下混合模式研究[J].实验科学与技术,2022,20(5):81-88.
- [2] 王磊,杨国练,陈维,等.VR技术在变电站仿真培训系统中的应用研究[J].自动化仪表,2021,42(9):25-29.
- [3] 郁鑫,王立扬,赵贝贝,等.虚拟仿真实验教学研究现状和发展趋势:以液态成形为例[J].实验室研究与探索,2021,40(12):216-221.
- [4] 孙月,孙雷,王鸿鹏,等.虚实结合的智能工程实验教学改革创新研究[J].实验科学与技术,2022,20(5):111-115.
- [5] 赵菊敏,李灯熬,刘琪.复杂环境下的感知定位虚拟仿真实验教学建设与实践[J].计算机教育,2021(4):111-115.
- [6] 张玉泽,管晓宁,丁倩,等.基于Unity 3D仿真技术的转杯纺纱虚拟仿真实验建设与教学应用[J].实验技术与管理,2021,38(3):158-162.
- [7] 赖小红,金卫.疫情下自动测试系统课程实验教学设计及实施[J].实验科学与技术,2022,20(2):62-66.
- [8] 侯国栋,李媛.基于“智能+教育”的虚拟实验共享平台设计策略研究[J].科技与创新,2022(11):12-15.
- [9] 冯岱鹏,胡炎,邵能灵,等.地下变电站虚拟现实仿真系统的研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(11):90-93.
- [10] 王大虎,白帆.VR技术在10 kV变电教学仿真系统的应用[J].实验室研究与探索,2019,38(10):105-108.
- [11] 周金字,李晓晖.面向产教融合的激光熔覆虚拟仿真实验平台开发[J].实验科学与技术,2022,20(2):28-32.
- [12] 孙建军,张颖杰,巴宇,等.高电压虚拟仿真实验教学探讨[J].实验科学与技术,2022,20(2):52-56.
- [13] 陈建,杜楠楠,曹毅,等.虚实结合的无人机控制实验课程教学设计与实践[J].实验室研究与探索,2022,41(1):175-180.
- [14] 程凌鹏,刘志平,柳炜开,等.基于Unity3D的港口虚实结合实习平台实验教学[J].实验科学与技术,2022,20(1):150-154.
- [15] 梁占红,廖晓辉,胡玉霞,等.基于虚实结合的电路实验混合式教学探索与实践[J].实验科学与技术,2022,20(6):89-92.
- [16] 金强山,冯光,李改锋.“物联网智慧农业”虚拟仿真实教学综合实训设计[J].计算机时代,2022(4):21-23.
- [17] 倪小敏,郑重,王喜世.基于合作学习模式的创新型实验教学研究[J].实验科学与技术,2022,20(4):52-55.