

铁路变配电维护 VR 仿真训练系统设计与实现

田野¹, 杜恒², 郭晶¹, 李萍^{2*}

1. 朔黄铁路发展有限责任公司 原平分公司, 山西 太原 030400

2. 北京大象科技有限公司, 北京 100071

DOI: 10.61369/TACS.2025080040

摘 要 : 针对重载铁路变配电设备运行环境复杂、维护难度大以及传统培训方式局限性等问题, 以朔黄铁路原平分公司东冶变配电所为原型, 通过3D建模技术和Unity3D平台, 模拟变电所实际工作状况和运行环境, 开发出高沉浸感、强互动性的变配电维护VR仿真训练系统。该系统能够实现设备巡视、倒闸操作、试验检修等标准化作业功能, 并通过多人协同技术, 支持多岗位人员配合完成故障处置演练, 有效解决了传统培训中场地、设备、安全和成本等问题, 助力变配电修试工快速提升专业技能。

关 键 词 : 铁路变配电; 虚拟现实(VR); 数字孪生; 维护作业; 故障处置; 技能培训

Design and Implementation of a Virtual Reality Maintenance Training Simulator for Railway Substations and Power Distribution

Tian Ye¹, Du Heng², Guo Jing¹, Li Ping^{2*}

1. Yuanping Branch, Guoneng Shuohuang Railway Development Co, Ltd, Taiyuan, Shanxi 030400

2. Beijing Elephant Technology Co, Ltd, Beijing 100071

Abstract : In response to issues such as the complex operating environment, high maintenance difficulty of heavy-haul railway power transformation and distribution equipment, and the limitations of traditional training methods, a VR simulation training system for power transformation and distribution maintenance with high immersion and strong interactivity has been developed. Taking Dongye Power Transformation and Distribution Station of Shuohuang Railway Yuanping Branch as the prototype, the system simulates the actual working conditions and operating environment of the substation through 3D modeling technology and Unity3D platform. This system enables standardized operations such as equipment inspection, switching operations, and testing/maintenance tasks. Furthermore, through multi-user collaboration technology, it supports coordinated fault handling drills involving personnel from multiple positions. This effectively resolves issues related to training space, equipment availability, safety, and cost inherent in traditional methods, contributing to the rapid enhancement of professional skills among power distribution maintenance and testing technicians.

Keywords : railway substation and distribution; virtual reality(VR); digital twin; maintenance operations; fault handling and response; skill training

引言

牵引变电站的运行对于整个牵引供电系统具有重要保障性作用。传统变配电培训主要依靠书本及多媒体教学, 教学培训的直观感受不高^[1]。学员在面对真实故障时, 难以将所学理论快速转化为实际操作步骤, 不知从何处入手进行排查和修复^[2]。

国内外众多学者已针对虚拟现实技术在电力培训领域的应用开展了广泛而深入的研究^[3]。祁永超^[4]等人开发实现了虚拟变电站的漫游巡视、设备学习、故障重现、模拟演练、答题考核等培训功能, 岳彪^[5]等人搭建了高铁牵引变电站一次系统仿真模型, 对其巡视及检修过程进行了仿真模拟。

综上所述, 传统变配电作业技能虚拟实训系统集中在单人的技能训练, 对于故障应急场景下多人协同处置流程的培训方面研究较少^[6], 本文以朔黄铁路原平分公司东冶变配电所为原型, 对变配电所变压器、断路器等一次设备及主变测控屏、馈线保护测控屏等二次设备进行建模, 模拟牵引变电所实际工作状况和运行环境, 依托标准化作业流程, 实现模拟变电所运行倒闸、日常作业检修与试验、设备标准化巡视、故障场景处置等功能, 扩展了多人协同应急处置流程的实训, 使得在复杂故障应急场景下, 团队成员之间的协作、沟通和流程执行能够得到有效训练。

基金项目: 国能朔黄铁路发展有限责任公司科技创新项目(SHTL-22-22)

作者简介:

田野(1990—), 男, 学士, 中级工程师, 主要研究方向: 铁路供电。

通信作者:

李萍(1986—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向: 虚拟现实技术、人机交互设计

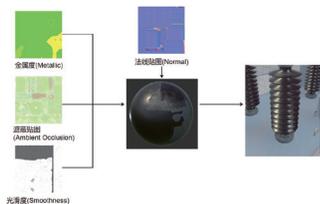
一、仿真训练系统虚拟场景搭建

本系统通过3dsMax 建模工具，Unity3D 引擎作为主要开发平台，使用 C# 语言编写脚本以实现场景中的交互功能。

(一) 虚拟变配电站的建模

本文通过变配电所总平面布置图、主接线图、设备安装图、装配图等图纸及现场采集的照片等资源对变配电专业设备物体进行结构分析，特征提取，用专业的三维建模工具如3DMax、Maya 软件创建设备高精度模型。

本文使用 Substance Painter 等工具通过贴图的方式为模型不同通道的贴图赋值，以电容器部件绝缘套管采用的金属材质为例，如图1所示，本文为材质提供多张贴图，获得高质量的模型表面细节和光影效果，从而增强场景沉浸感。



(二) 场景制作

本系统基于 Unity3D 引擎构建真实的变配电站，将变配电站的主控制室、27.5KV 开关柜室、10KV 高压室等模型导入 Unity3D 引擎，并为其赋值正确的贴图和材质。

接着为场景设置天空球、HDRI 环境贴图、方向光以模拟自然光照环境。

最后根据场景中的实际需求放置所有人工光源，并设置光照参数以及选择烘焙方案，烘焙出带光照的贴图，以减小系统运行时实时计算光照带来的运行开销。

二、仿真训练系统实现

(一) 标准化作业模块的实现

变配电站中电力设备的标准化作业模块基于标准作业指导书将作业任务拆解成详细的操作步骤，该步骤是考核模块评分的基准，系统通过统一的步骤控制器，控制考核场景的顺序执行。

每个步骤控制器中包含高亮、使用工具、触发器等步骤内容，高亮参数用于提示该步骤需要操作的物体，每个步骤开始前系统通过调整物体的材质闪烁提示用户本步要操作的物体，使用工具参数配置了该步骤被正确触发后使用的工具，触发器参数配置了当本步骤物体被正确触发后要执行的动画，如拧螺丝动画等。

以变配电站的巡视与检查场景为例，任务步骤拆解如表1所示。

表1 变配电站巡视与检查场景步骤表

序号	章标题	步骤	步骤内容	关键词
1	巡视前工作	作业前准备	根据作业需求，组织人员携带防护工具及常用材料：安全帽，手电，测温器，望远镜，变配电巡视记录表。	作业前准备

2	巡视前工作	检查安全措施	值班员检查安全措施是否设置好，准备进行作业。	检查安全措施
3	控制室巡视	巡视视频安全监控盘	巡视视频安全监控盘：要求盘柜上的设备清洁，锈蚀面积不超过规定，安装牢固。	视频安全监控盘整体
4	控制室巡视	巡视通信处理盘	巡视通信处理盘：要求盘柜上的设备清洁，锈蚀面积不超过规定，安装牢固。	通信处理盘整体

(二) 故障处置模块实现

由于变配电所设备的分散性，故障场景处置时往往需要多个岗位多人协作处置，本文研究了仿真训练系统虚拟场景中多人协作故障处置模块的实现。仿真训练系统的运行流程如图2所示。

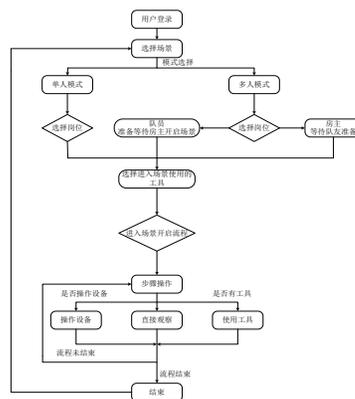


图2 多人协同任务流程示意图

多人协作故障处置模块的核心功能是两个虚拟场景的信息同步，用户登录信息、进入的场景信息仅在用户登录及场景进入时同步，采用的是 HTTP 协议进行通信。场景内设备状态、人物位置信息的同步需要实时性及可靠性要求较高，Redis 内存数据库解决了传统关系型数据库在实时数据存取上的性能瓶颈^[7]，因此本文基于开源组件 Redis 设计实现了高可靠性、高实时性的分布式缓存系统。数据传输示意如图3所示。

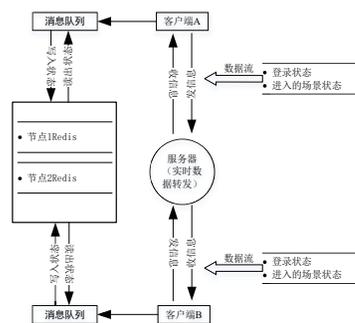


图3 多人协同数据传输示意图

三、结束语

铁路变配电维护 VR 仿真训练系统通过在虚拟的变配电站环境中搭建完整的变配电设备，模拟牵引变电所实际工作状况和运行环境，依托朔黄铁路原平分公司修试工标准化作业流程，实现模拟变配电站运行倒闸、日常作业检修与试验、设备标准化巡

视、多人协同故障应急场景处置等功能，以达到虚拟化技能实训与考核的目的。该方法有效解决了变配电修试工培训中场地、设备、安全、成本等因素限制的问题，利用数字化的虚拟仿真技术

手段，拓展了变配电设备故障应急场景的仿真模拟方法，为变配电修试工的技能提升提供技术支持。

参考文献

- [1] 田子昭. 三维虚拟牵引变电站交互仿真系统设计[D]. 兰州交通大学, 2021.
- [2] 余亦睿. 牵引供电三维虚拟仿真系统的设计与开发[D]. 西南交通大学, 2020.
- [3] 覃业畅, 田阳, 黄金河, 等. 基于虚拟现实的灭火器使用训练系统设计[J]. 现代电子技术, 2024, 47(18): 139-143.
- [4] 祁永超, 田铭兴, 陈小强, 等. 基于 Unity3d 的变电站虚拟仿真培训系统构建[J]. 兰州交通大学学报, 2021, 40(1): 53-59.
- [5] 岳彪, 王阳萍, 党建武, 等. 高铁牵引变电站巡视及检修沉浸式虚拟仿真资源开发[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(5): 166-170.
- [6] 徐庆尧, 耿艳栋, 唐立文, 等. 基于虚拟现实技术的航天分队战术训练平台研究[J]. 现代电子技术, 2021, 44(21): 21-24.
- [7] 程远遥, 王昕怡, 陈逸, 等. 基于 Redis 的 ATS 缓存系统设计[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(7): 111-115.