

DOI: 10.7667/PSPC161843

# 沉浸式变电站故障仿真系统开发

吴冰<sup>1,2</sup>, 黄陈<sup>1</sup>, 朱喜荣<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000;  
2. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建 福州 350003)

**摘要:** 针对现有变电站仿真培训系统存在的故障仿真不足、缺乏现场感以及考核方式简单的问题, 以 110 kV 变电站为仿真对象, 利用 Unity3D 完善的交互功能和 HTC vive 强大的硬件支持, 搭建了沉浸式变电站故障仿真系统。首先用 3DMAX 软件建模, 然后将模型导入 Unity3D 中, 再利用 SteamVR 插件设定沉浸式交互场景, 并将设备和故障信息存入 MySQL 数据库, 开发了学员考核模块。该系统实现了变电站沉浸式培训和学员故障考核的功能。系统开发过程中, HTC vive 硬件平台的引入为学员培训带入了沉浸感, 激发了学员学习热情, 提升了培训效率; 考核模块的设计, 完善了系统考核评价功能, 为学员学习提供了评判依据。

**关键词:** 沉浸式; 变电站; 故障处理; 仿真; 培训

## Development of immersive substation accidents simulation system

WU Bing<sup>1,2</sup>, HUANG Chen<sup>1</sup>, ZHU Xirong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;  
2. State Grid Fujian Economic Research Institute, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** Aiming at problems existing in current substation training systems, such as weak to fault simulation, the lack of the sensed presence and simple inspection way, the immersive substation accidents simulation system is developed. The simulation object is a 110 kV substation. And the perfect interactive functions offered by Unity3D and the powerful hardware support of HTC vive are used in this system. Firstly, the models of substation's primary equipment are established by 3DMAX software, then the models are imported into Unity3D software, the immersion interactive scenario is set by the SteamVR plug-in, and the faults information and equipment information are deposited into the MySQL database. In this way, the student assessment module is developed. This system realizes the functions of immersion training in substation and student assessment of failure. In the process of system development, the hardware platform of HTC vive is used to bring the immersion for student's training. It inspires the student's passion and improves the training efficiency. And the design of the assessment module completes the evaluation function of the system, and provides the evaluation evidences for the student's study.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1404612).

**Key words:** immersion; substation; fault handling; simulation; training

## 0 引言

国民经济的发展离不开电, 变电站则是为用户提供安全、稳定电力的重要环节。变电站在运行过程中往往由于设备本身的原因、天气的原因以及维护人员的误操作等引发各种形式的安全事故, 不仅会造成人员伤亡, 而且会影响变电站正常运行, 带

来巨大的经济损失。单纯地靠引入先进的控制技术以及提高变电设备的智能化程度, 不能从根本上解决问题。变电站安全稳定的运行离不开人的参与, 因此对变电站工作人员的安全培训以及技能培训显得尤为重要。

传统的变电站培训以课堂教育方式进行, 通过课本、图纸及模拟板等方式来模拟, 形式单一, 内容枯燥, 学员学习效率低。变电站内部工作人员的培训很大程度上延续了“师徒传帮带”的传统, 由

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1404612)

于各师傅的经验、经历以及教育的侧重点不同,因此带出来的徒弟有很强的主观特色,不能很好地满足变电站运行维护的要求。对此,孙璐<sup>[1]</sup>提出沉浸式虚拟环境及其在变电站仿真中的应用方案,研究了沉浸式虚拟环境的概念、特点和沉浸式虚拟环境中人机交互的关键技术,尤其是基于虚拟手的人机交互,系统缺乏对变电站必要的事故仿真研究,培训效率低;王艳芳<sup>[2]</sup>提出变电站事故三维仿真系统的研究与实现方案,建立了变电站事故三维仿真系统,并开发出了学员考核平台,但未打破传统变电站仿真培训系统的缺陷,系统缺乏沉浸感和现场感,学员培训易受外界环境干扰,学习积极性不高;陈永波<sup>[3]</sup>等人提出沉浸式变电站仿真培训系统的设计与实现方案,系统从视觉、听觉和交互方式上为变电站运行人员构建了沉浸式变电站虚拟实境,为变电站培训带入了现场感,但系统仅从场景漫游和设备交互方面对变电站进行沉浸式仿真研究,缺少故障仿真培训环节和必要的考核平台,系统研发成本高,运用有局限性。上述学者都从各自专业的角度对变电站仿真培训系统进行了研究与开发,最终实现的效果各有不同,但尚未能将沉浸式技术引入变电站故障仿真研究中,系统缺乏必要的沉浸感和现场感,学员培训易受外界干扰,培训效率低。

针对以上不足,开发了沉浸式变电站故障仿真系统。在系统开发过程中,先利用 3DMAX 软件对变电站一、二次设备建模,再将建立的模型导入 Unity3D 中,实现系统交互仿真的功能,然后引入 HTC vive 硬件设备,通过 SteamVR 软件设置体验模式,再在 Unity3D 中导入 SteamVR 插件,完成硬件设备和软件平台的通信。学员戴上头盔进入场景后可选择漫游模式、设备交互模式以及故障处理模式来进行沉浸式仿真培训,在进行故障处理的过程中,由 MySQL 数据库存储学员操作信息,并给出最终成绩。该系统将沉浸式仿真技术运用到变电站故障仿真培训过程中,既加强了对学员故障处理能力的培训,又为培训带入沉浸感和现场感,激发了学员兴趣,提升了培训效率;系统开发出考核平台,弥补了传统变电站培训系统的不足,为学员学习提供评判依据。

## 1 系统开发总体方案

系统开发以焦作 110 kV 变电站为原型,对其一次侧设备:母线、开关、隔离刀闸、电流互感器(CT)、电压互感器(PT)、变压器、电力电缆、避雷器、避雷针、电力电容、谐波阻抗器及接地电压器等等,二次侧设备:测量表计、绝缘监察装置、控制和信

号装置、继电保护及自动装置、直流电源设备、塞流线圈及综合自动化设备等进行了三维建模以及交互仿真。沉浸式变电站人机交互框架图如图 1 所示。

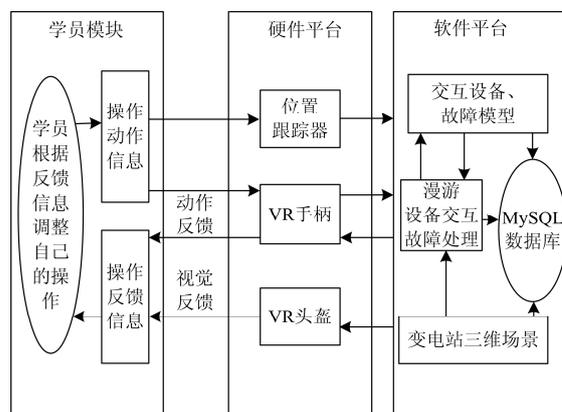


图 1 沉浸式变电站人机交互框架图

Fig. 1 Frame diagram of the human-computer interaction in immersive substation

由图 1 可知,沉浸式变电站故障仿真系统开发主要分 3 个模块:学员模块、硬件平台和软件平台。在学员模块中,学员接收通过 HTC vive 设备传来的动作反馈信息和视觉反馈信息,然后根据反馈信息调整在变电站三维场景中的操作,再将操作动作信息通过硬件设备传送到三维场景中,达到技能培训以及故障处理培训的目的;硬件平台是人机交互的枢纽,在系统开发过程中,选取 HTC vive 设备作为沉浸式仿真的硬件支撑,可将三维场景信息和反馈信息上传至学员模块,将学员操作信息下发给计算机软件平台,并加入位置跟踪器,实现实际操作与软件仿真同步跟踪功能;软件平台是实现变电站三维场景生成、沉浸式仿真以及学员考核功能的关键部分,将 3DMAX 软件所建立的变电站三维模型导入 Unity3D 中,在 Unity3D 中设置虚拟场景与硬件设备交互条件,之后学员可通过 VR 手柄和 VR 头盔在变电站三维场景中进行漫游、设备交互以及故障处理,并将设备信息、故障信息、故障处理信息及三维场景信息存入 MySQL 数据库,实现系统自动考核功能<sup>[4-6]</sup>。

## 2 系统硬件配置

HTC vive 硬件平台的搭建是实现沉浸式变电站故障仿真的基础。HTC vive 是由 HTC 与 Valve 联合开发的一款 VR 头显产品,主要包括:两个红外线基站、串流盒、VR 头盔、VR 手柄及 Valve 的 SteamVR 对其提供的技术支持,故而在 SteamVR 平台上可以体验沉浸式虚拟现实景观,并通过 VR 头盔和 VR 手

柄在 Unity3D 平台中实现实时交互功能。

在系统开发中,所采用 VR 头盔产品参数如下,单眼分辨率 1200×1080,刷新率 90 fps,追踪位置 4.5×4.5 m,内置器件有位置追踪的游戏控制器,Steambox 主机,内置陀螺仪、加速度计和激光定位传感器,追踪精度 0.1°。为在 PC 机上调试 HTC vive 设备,对 PC 机要求如下,GPU 需要 NVIDIA GeForce GTX970/AMD Radeon R9 290 同等或更高的版本,CPU 需要 Intel i5-4590/AMD FX-8350 同等或更高的版本,RAM 需要 4 GB+, Video Output 需要 HDMI 1.4 或 DisplayPort 1.2 或更高版本,操作系统选用 Windows 7SP1 或更新的版本。在搭建红外基站时,可选择有线模式和无线模式,在无线模式下需将两个基站上的频道调为 B/C,在有线连接时需将基站频道调为 A/B。基站工作过程中,状态指示灯为绿色表示工作正常,闪速表示出现位移,在此情况下需对基站进行校正。

### 3 关键技术研究

使用 HTC vive 设备以及 Unity3D 软件实现沉浸式变电站故障仿真的流程如图 2 所示。系统开发过程中,首先要通过拍照、录像等多种方式,收集变电站一、二次设备图像素材,再根据素材信息在 3DMAX 里建立变电站场景以及设备的三维模型,然后将模型导入 Unity3D 中进行交互<sup>[7-9]</sup>。利用 Unity3D 软件平台进行沉浸式培训功能开发时,可接入 HTC vive 设备实现人机交互,让学员培训获得沉浸感和现场感,并且引入系统考核平台,为学员培训效果评估提供依据。最后设计系统登录界面以及运行界面,再测试系统的运行情况,并将系统打包成“.exe”文件发布。

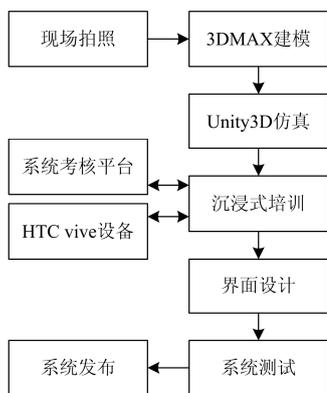


图 2 系统设计流程

Fig. 2 Process of system design

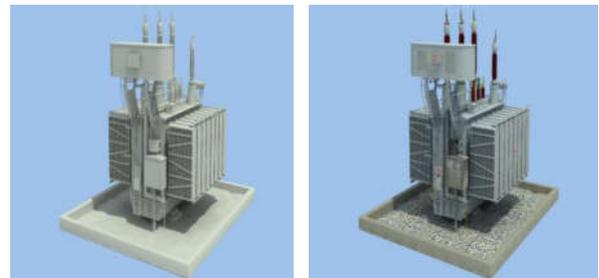
#### 3.1 三维可视化

变电站设备及工作环境的三维可视化操作由三

维建模以及模型的真实化处理两部分组成。三维模型的建立是系统开发的前提,模型的真实化处理是使培训获得真实感的必要条件。

系统设计过程中,三维模型的建立在 3DMAX 建模软件里完成,利用 3DMAX 软件建模主要的方法有:多边形(Polygon)建模、非均匀有理 B 样条曲线建模(NURBS)和细分曲面建模(subdivision surface)。在建立变电站设备以及场景模型时,以多边形建模方式为主。模型的构建来源于实物,不能依据主观想象凭空捏造。在系统开发过程中,应根据所收集的变电站设备及场景的技术资料(照片、视频、设备参数等),来确定仿真场景中模型的尺寸、外观及内部构造等参量。如变压器建模时,先根据收集的变压器资料确定模型的大小,再在 3DMAX 中建立相同大小的标准几何体来构建变压器整体轮廓,然后将标准几何体转化为可编辑多边形,为模型添加样条线,利用挤出、缩放等命令,在点、线、面、元素 4 种层级下勾勒变压器细节部件。在建模过程中要注意删除模型中不必要的、看不见的面,减轻计算机运行负担;尽量不要使用布尔、倒角等命令,防止模型导入 Unity3D 时出错;多使用复制、镜像等命令,加快建模效率。

在三维模型建立完成后,需对模型进行真实化处理。模型的真实化处理是使模型逼近实物的关键步骤,主要包括赋予模型材质和贴图以及设置灯光。模型的材质要根据实物的特性进行调节,一般通过 Vray 材质来设置。通过调节 Vray 材质的反射、漫反射、高光、折射、反射光泽度及凹凸等参数,可使模型的视觉效果与实物接近<sup>[10-12]</sup>。模型的细节部分可通过贴图来表现,贴图的大小一般选为 2 的幂次,可加快图片的渲染速率。变压器贴图效果对比图如图 3 所示。为使场景中模型的整体效果更为逼真还需进行打灯操作,根据模型在实际环境中的亮度、阴影效果等,设置 Vray 灯光的位置、光照强度及光照范围等参数,在整体效果满足要求后,必要的情况下可进行补光操作。



(a) 贴图前

(b) 贴图后

图 3 变压器贴图效果对比图

Fig. 3 Map effect contrast figure of transformer

## 3.2 沉浸式培训

### 3.2.1 漫游

在变电站三维场景中漫游主要是使学员进行设备巡视以及场景故障处理。当学员戴上 VR 头盔进入变电站故障仿真系统后,可选择进入正常场景或故障场景。在正常场景中,学员可以身临其境地进行变电站设备巡视,了解变电站整体构造以及一、二次侧主要设备;在故障场景中,系统随机地在变电站一次侧设置故障,如变压器瓷瓶破裂,互感器冒烟等,学员进入故障场景后可寻找故障并对故障进行分析以及处理,锻炼学员故障处理能力<sup>[13]</sup>。故障场景漫游如图 4 所示。

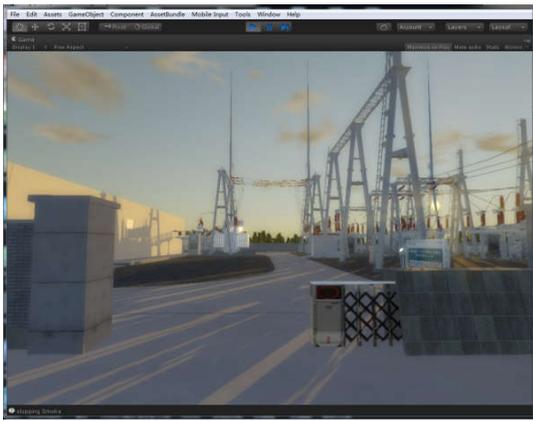


图 4 故障场景漫游

Fig. 4 Roaming of fault scenarios

为在 Unity3D 中实现沉浸式漫游,应引入 SteamVR 插件,并将插件中的预置体[CameraRig]和[SteamVR]导入变电站场景中,[CameraRig]下包含了 Controller(left)(左手柄控制器)、Controller(right)(右手柄控制器)、Camera(head)(头部显示器)3 个预置体。学员戴上 VR 头盔,拿起 VR 手柄后,由[SteamVR]预置体实现 HTC 设备与 Unity3D 软件的通信,通过调用[CameraRig]下的组件信息可使学员在变电站场景中行走以及通过手柄与场景中的设备进行交互。为使学员在漫游时不超出基站作用的空间,可通过“SteamVR\_PlayArea.cs”脚本设定漫游区域的大小,并在学员到达设定边界时系统自动给出提示信息。

### 3.2.2 设备交互

学员在变电站场景内漫游过程中,可以与场景中的设备进行交互。基于沉浸式的变电站设备交互主要靠 VR 手柄实现,在虚拟场景中,用手柄接触变电站设备可进入设备交互场景,在此场景中设备旋转展示,通过手柄发出的射线照射场景中 UI 界面上的按钮可改变设备展示方式,实现设备的自

动拆分、镜头的拉近、文字注解的显示等功能,让学员全方位多角度地掌握各个设备的构造、工作原理等<sup>[14-16]</sup>。

在设备交互过程中,为使 VR 手柄接触设备后有点击事件触发,可在各个设备上添加 Box Collider(碰撞检测)组件,在事件触发后调用 EquipmentInteraction()函数,进入设备展示界面;为使学员在场景中通过 VR 手柄发出射线控制设备展示方式,可在 Unity3D 中导入 VRTK(可交互对象)插件,通过在 Controller(left)以及 Controller(right)上添加 VRTK\_ControllerEvents 脚本来监听手柄的输入信息,设备的自动拆分、镜头的拉近、文字注解的显示等功能,都可以通过引入 DoTween 插件来实现。

### 3.2.3 故障处理

变电站场景中常见的故障分为静态故障和动态故障。静态故障指的是场景中设备故障静态呈现,如变压器瓷瓶破裂、隔离开关构架底座变形、标牌脱落等。动态故障指的是场景设备故障有明显的动态表现形式,如互感器冒烟、变压器起火等。学员进入故障场景后,可在场景中寻找教员设置的故障,再通过 VR 手柄发射的射线照射故障处,系统弹出故障处理界面,在该界面中罗列了此故障的处理步骤,要求学员根据自己的经验进行排序,并将最后提交的结果存入 MySQL 数据库中,完成对学员故障处理能力的考核<sup>[17-19]</sup>。变压器起火故障处理如图 5 所示。

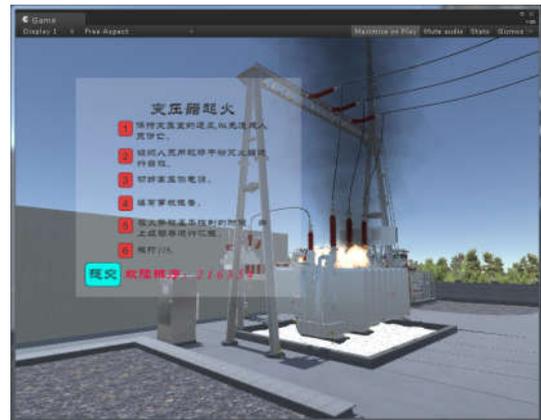


图 5 变压器起火故障处理

Fig. 5 Fault handling of transformer fire

静态故障模拟主要在 3DMAX 里实现,将故障设备模型转化为可编辑的多边形,在点、线、面、元素 4 个层级下对静态故障进行编辑。如变压器瓷瓶破裂,可将变压器瓷瓶部分的模型转化为可编辑多边形,再选择线层级勾勒出瓷瓶破裂部分的形状,

在面层级下,选中瓷瓶破裂的面,利用挤出命令将所选面向瓷瓶内挤出,最后对所挤出的面进行塌陷,即可表现出变压器瓷瓶破裂的效果<sup>[20-21]</sup>。动态故障模拟主要在 Unity3D 里实现,通过 Unity3D 自带的粒子系统即可表现冒烟、着火等动态故障现象。如变压器起火,可在变压器模型起火的部位放置 Flames(火焰)粒子系统,调节 Duration(粒子持续时间)、Looping(粒子循环)、Prewarm(粒子预热)、Start Delay(粒子初始延迟)、Start Lifetime(粒子生命周期)、Start Speed(粒子初始速度)及 Start Color(粒子发射初始颜色)等参数,来改变火焰在场景中的表现形式。

### 3.3 考核平台

为给学员培训效果提供评判依据,开发了变电站故障处理考核平台。首先由教员根据培训内容的需要设定变电站场景中的故障,学员戴上 VR 头盔进入故障场景后,通过沉浸式漫游方式寻找场景中故障,再通过 VR 手柄交互,进入故障处理界面。在故障处理界面中,系统给出故障处理相关信息,学员根据自己经验对处理信息进行排序,并将排序结果存入 MySQL 数据库中的学员操作步骤表,最后比较 MySQL 数据库中的故障处理信息表与学员操作步骤表的结果,给出学员最终的考评成绩。系统考核流程如图 6 所示。

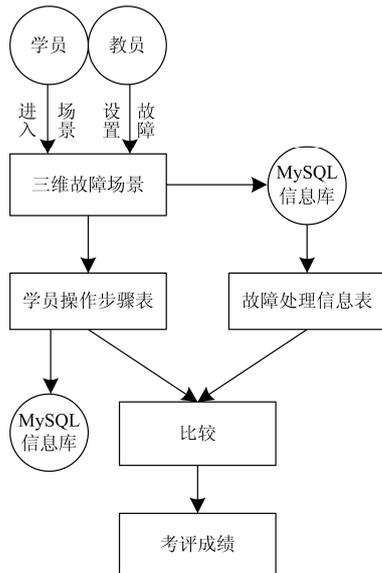


图 6 系统考核流程图

Fig. 6 Flow chart of system assessment

在利用 MySQL 数据库储存数据信息时,为保存设备故障信息、故障处理信息等,定义了相关数据库信息表。如 Trainee\_info 表用来储存学员的注册信息,Equipment 表用来存储变电站中的设备信

息,Acc\_phenomena 表用来存储变电站设备常见故障信息,Temp\_accjphenomena 表用来存储教员设置的故障信息,Trainee\_deal\_steps 表用来存储受训人员在故障检查和处理时的记录,Trainee\_score 表用来存储受训人员在检查和处理故障后,提交数据库,数据库对其信息存储并和教员设置的临时故障表作比较后,对学员的结果给出评估分数。

## 4 系统发布

沉浸式变电站故障仿真系统设计完成后,可对系统进行发布。Unity3D 软件提供了强大的系统兼容性,可在 Web Player、PC、IOS、Android、Tizen、WebGL 等平台上发布。在软件平台搭建完成后,将场景文件的 Asssets 资源文件夹打包,通过 File-> Build Settings 来设置系统发布平台、发布系统的屏幕分辨率等,并将系统运行过程中所需加载的场景导入 Scene In Build 中,保证系统运行过程中在各个场景中切换,最后生成“.exe”文件,双击即可在发布平台上运行。沉浸式故障仿真系统登录界面如图 7 所示。



图 7 沉浸式故障仿真系统登录界面

Fig. 7 Login screen of immersive substation accidents simulation system

由图 7 可知,在进行沉浸式变电站故障仿真培训时,学员应注册帐号,进入场景后,学员即可戴上 VR 头盔进行沉浸式体验。在场景中学员可通过 VR 手柄选择进入正常场景或者故障场景,在正常场景中学员可进行场景漫游和设备交互,在故障场景中学员可进行故障处理,并完成故障处理考核。

## 5 结语

1) 系统开发过程中,引入虚拟现实技术,打破传统的变电站入职培训模式,将枯燥的理论讲解用高度逼真的三维模型代替,激发了学员学习积极性,提升了培训效率。

2) 系统开发以变电站故障处理为重点,将变电站故障划分成静态故障和动态故障两类,并在场景中将故障真实地呈现在学员面前,解决了现有变电站仿真系统故障仿真不足的问题,学员可在故障场景中锻炼发现故障以及解决故障的能力。

3) 通过 HTC vive 设备引入沉浸式变电站仿真技术,让学员置身于变电站场景中,通过 VR 头盔、VR 手柄与场景中的设备交互,为学员带入了真实的现场感,解决了学员在以往变电站仿真培训中易受外界环境干扰的问题,大大提升了学习效率,缩短了培训周期。

4) 开发出了系统考核平台,弥补了以往变电站仿真培训系统的不足,为培训效果好坏提供评判依据,教员可根据考核结果给学员制定不同的训练方案,提高了培训的针对性。

5) 采用 Unity3D 进行系统开发,降低了开发难度,Unity3D 有强大的兼容性,在开发过程中可通过各种功能插件将开发简洁化,降低了开发成本,便于业余爱好者上手。

## 参考文献

- [1] 孙璐. 沉浸式虚拟环境及其在变电站仿真中的应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.  
SUN Lu. Immersive virtual environment and its application in transformer substation simulation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [2] 王艳芳. 变电站事故三维仿真系统的研究与实现[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.  
WANG Yanfang. Research and implementation of three-dimensional simulation system in substation accidents[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [3] 陈永波, 林昌年, 李军锋, 等. 沉浸式变电站仿真培训系统的设计与实现[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2034-2038.  
CHEN Yongbo, LIN Changnian, LI Junfeng, et al. Research and development of immersive simulation training system[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 2034-2038.
- [4] 何志鹏, 郑永康, 李迅波, 等. 智能变电站二次设备仿真培训系统可视化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 111-114.  
HE Zhipeng, ZHENG Yongkang, LI Xunbo, et al. Visualization research on secondary equipments simulation training system for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 111-114.
- [5] 杨晓东, 黄东平, 陈世勇, 等. 基于全图形建模方式的电力仿真系统继电保护库的设计与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 116-119.  
YANG Xiaodong, HUANG Dongping, CHEN Shiyong, et al. Design and application of the relay protection module library based on the full graphics modeling in power simulation system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 116-119.
- [6] 赵梓蓉. 220 kV 变电站仿真培训考核系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.  
ZHAO Zirong. Simulation and training evaluation system for 220 kV substation design and implementation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- [7] 冯岱鹏, 胡炎, 邵能灵, 等. 地下变电站虚拟现实仿真系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 90-93.  
FENG Daipeng, HU Yan, TAI Nengling, et al. Research of underground substation simulator based on virtual reality[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 90-93.
- [8] 陈东亮. 基于虚拟现实的微机变电站仿真培训系统平台[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.  
CHEN Dongliang. Simulation and training system platform on computer based on virtual reality for substation[D]. Xiamen: Xiamen University, 2007.
- [9] 高厚磊, 刘益青, 苏建军, 等. 智能变电站新型站域后备保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 32-37.  
GAO Houlei, LIU Yiqing, SU Jianjun, et al. New type of substation-area backup protection for intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 32-37.
- [10] 许家焰, 陈浩敏, 习伟, 等. 基于 OS2 的变电站一体化监控模拟仿真系统的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 111-116.  
XU Jiayan, CHEN Haomin, XI Wei, et al. Design and realization of integrated supervision and control simulation system based on OS2 in substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 111-116.
- [11] 王磊, 万秋兰, 张雨飞, 等. 客户变电站仿真培训系统柔性构建技术研究[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 84-89.  
WANG Lei, WAN Qiulan, ZHANG Yufei, et al. Study on flexible building technology for customer substation simulating and training system[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 84-89.
- [12] 江叶峰, 魏文辉, 高峰, 等. 基于 SG-OSS 的调控一体化仿真培训应用的设计与实现[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 80-85.  
JIANG Yefeng, WEI Wenhui, GAO Feng, et al. Design

- and implementation of dispatcher and operator training simulator based on SG-OSS[J]. *Electric Power*, 2014, 47(4): 80-85.
- [13] 王大虎, 高会争, 陈侠. 基于 Quest3D 的变电站仿真培训系统[J]. *中国电力*, 2016, 49(9): 62-64.  
WANG Dahu, GAO Huizheng, CHEN Xia. Substation simulating and training system based on Quest3D[J]. *Electric Power*, 2016, 49(9): 62-64.
- [14] 谢成. 基于虚拟实境技术的变电站三维仿真培训平台的研制[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.  
XIE Cheng. VR-based three-dimensional substation training system designing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [15] 张瀑. 虚拟现实变电站仿真培训系统[D]. 天津: 天津大学, 2007.  
ZHANG Pu. Substation training system based on virtual reality[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [16] 姜芳芳, 来文青, 龚庆武, 等. 虚拟现实在变电站仿真培训中的应用[J]. *高电压技术*, 2005, 31(7): 68-70.  
JIANG Fangfang, LAI Wenqing, GONG Qingwu, et al. Application of virtual reality in substation simulation and training system[J]. *High Voltage Engineering*, 2005, 31(7): 68-70.
- [17] 叶远波, 孙月琴, 黄太贵, 等. 智能变电站继电保护二次回路在线监测与故障诊断技术[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(20): 148-152.  
YE Yuanbo, SUN Yueqin, HUANG Taigui, et al. Online state detection and fault diagnosis technology of relay protection secondary circuits in smart substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(20): 148-152.
- [18] 张巧霞, 贾华伟, 叶海明, 等. 智能变电站虚拟二次回路监视方案设计及应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(10): 123-127.  
ZHANG Qiaoxia, JIA Huawei, YE Haiming, et al. Design and application of virtual secondary circuit monitoring in smart substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(10): 123-127.
- [19] 阎光伟, 平红燕. 基于虚拟人行为的三维变电站仿真培训系统[J]. *电力自动化设备*, 2010, 30(7): 121-123.  
YAN Guangwei, PING Hongyan. Three-dimensional substation simulation & training system based on virtual human behavior[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2010, 30(7): 121-123.
- [20] 李晓明. 500 kV 变电站仿真培训系统的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.  
LI Xiaoming. Research on the application of 500 kV transformer substation simulation training system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [21] 黄志兴. 三维交互式变电站仿真系统设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.  
HUANG Zhixing. Design of the substation simulation system with 3D interaction function[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.

收稿日期: 2016-11-06; 修回日期: 2016-12-27

作者简介:

吴冰(1964—), 男, 博士, 教授, 硕导, 研究方向为图像处理、虚拟现实; E-mail: 2386015390@163.com

黄陈(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为虚拟现实、变电场仿真; E-mail: 985878074@qq.com

朱喜荣(1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向为嵌入式、虚拟现实。E-mail: 35249412@qq.com

(编辑 周金梅)