DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)02-0089-06.

# 基于虚拟现实的电网安全培训仿真系统设计

王科鹏，杨华昆，丁 士

（中国南方电网有限责任公司，广东 广州 510663）

**摘 要：**电网安全培训仿真系统的人机交互性较差，存在系统平均上线率低、培训满意度差的问题，为此提出基于虚拟现实的电网安全培训仿真系统设计方法。设计虚拟现实应用端，利用虚拟现实应用端构建出系统软件架构，在架构内建立出虚拟场景，达成人机交互的目的。在系统内设计软件体系，将其与虚拟现实体感交互设备相结合，完成系统软件设计，实现电网安全培训仿真的体感交互；基于虚拟现实软件设计，该方法设计出不同的模块功能，其中缺陷培训功能模块能够使受训人员实行多种训练，大大地提升了培训效率，结合系统软件设计，实现电网安全培训仿真系统整体设计。实验结果表明，通过对该方法实行平均上线率测试及培训满意度测试，验证了该方法的有效性强。

**关键词：**虚拟现实；电网安全培训；仿真系统

中图分类号：TP391.98 文献标识码：A 文章编号：1003-7241(2025)02-0089-06

# Design of Power Grid Security Training Simulation System Based on Virtual Reality

**WANG Ke-peng, YANG Hua-kun, DING Shi**

( China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663 China )

**Abstract:** The human-computer interaction of the power grid security training simulation system is poor, and there are problems such as low average online rate of the system and poor training satisfaction. Therefore, a design method of power grid security training simulation system based on virtual reality is proposed. It designs the virtual reality application side, uses the virtual reality application side to build the system software architecture, and creates a virtual scene within the architecture to achieve the purpose of human-computer interaction. It also designs the software system in the system, combines it with the virtual reality somatosensory interaction equipment, completes the system software design, and realizes the somatosensory interaction of power grid safety training simulation, based on the virtual reality software design, this method designs different module functions, among which the defect training. The functional module enables trainees to carry out various trainings, which greatly improves the training efficiency. Combined with the system software design, the overall design of the power grid safety training simulation system is realized. The experimental results show that the effectiveness of the method is verified by implementing the average online rate test and the training satisfaction test.

**Keywords:** virtual reality; power grid security training; simulation system

## 0 引言

随着电网需求日益增加[1]，人们对变电站的要求越来越高，变电站运行人员在培训时所用的培训方式已经不能满足如今的培训需求[2]。这主要是因为传统的培训方式与实操环境相差大，导致培训效果差，所以为了能够有效地培训变电站人员，需要重新设计电网安全培训仿真系统，达到给变电站人员提供好的培训环境的目的，令变电站人员能够更好地实现交互，解决变电站人员培训体验差的问题。

丛丛[3]等人提出城市轨道交通行车作业虚拟仿真实训系统的设计与应用方法，该方法叙述了培训系统的主要开发流程及各个模块的功能，基于虚拟现实技术构建出能够实操的教学实训平台，将所有的教育理念全部引入到设计的平台中，便于教师实施教学的同时还可以使学员产生浓厚的学习兴趣，以此实现培训仿真系统的整体设计，该方法构建的实训平台存有欠缺，存在系统设计效果差的问题。司明舒[4]等人提出基于ISD模型的福建省医养护理员培训体系设计探索方法，该方法优先设计了一个培训构架，在架构中以ISD模型为基础，建立出学员的培训体系，并在培训体系中设计了不同的培训环节，根据培训环节内的不同流程及顺序培训学员，从而实现培训系统设计方法，该方法设计的培训构架不够完善，存在上线平均率低的问题。董博凯[5]等人提出罐区作业安全培训系统的设计与开发方法，由于人们对安全作业知

收稿日期：2023-03-03

识的匮乏，导致人们在作业期间容易发生危险，所以要加强人们的安全知识，以此为基础该方法设计了一个安全培训系统，因为传统的安全培训系统不能增强培训效果，所以该方法在安全培训系统中设计了仿真功能，为了使仿真功能发挥到极致，将该功能与事故树分析相结合，增强仿真效果，有利于提高学员的安全意识，进而实现了安全培训系统的设计，该方法设计的仿真功能不够稳定，存在培训满意度差的问题。

为了解决上述方法中存在的问题，提出基于虚拟现实的电网安全培训仿真系统设计方法。首先设计虚拟现实应用端，实现电网安全培训仿真系统人机交互，设计电网安全培训仿真系统软件架构。引入虚拟现实体感交互设备，提升用户应用电网安全培训系统的体验感，设计电网安全培训系统软件的开发层、工具层及应用层，实现虚拟现实与人机交互的变电站巡视、操作、学习等训练技术。最后设计电网安全培训仿真系统的功能模块，包括日常培训功能模块、缺陷培训功能、仿真培训控制功能模块，实现电网安全培训仿真系统设计。

## 1 基于虚拟现实的电网安全培训仿真系统架构

### 1.1 虚拟现实应用端设计

虚拟现实技术融合了多媒体技术、仿真技术、传感器技术等，该技术在电网安全仿真研究中是一条崭新的途径。由于虚拟现实技术在计算机网络中使用广泛，而多数虚拟现实技术中都包含VR技术，利用VR可以建立出用户想要构建的真实仿真环境[6]。在仿真环境内，人们可以通过先进的交互设备实现人机交互，用户在虚拟环境中能够生成与真实环境的相同感受，如视觉、听觉、触觉等都达成一致。

利用虚拟现实技术实现人机交互时，不论使用的范围、时间的长短，任何技术都无法与虚拟现实技术比拟。通过虚拟现实技术培训电网人员时，即使培训的难度极高，也丝毫不影响虚拟现实技术的培训效果，这也是大多电力企业利用虚拟现实技术实行培训的原因。在电网安全培训仿真系统中，VR应用端是实现虚拟现实训练的关键环节。从图1可以看出，VR应用端的开发流程包括：开发规划、创建虚拟现实模型、开发虚拟现实应用和虚拟现实技术。

### 1.2 电网安全培训仿真系统整体架构设计

根据上述对虚拟现实技术的分析，基于虚拟现实技术设计电网安全培训仿真系统技术架构，具体设计如图2所示。

(1) 如图2可知，在电网安全培训仿真系统中，三维建模、VR层和驱动层是电网安全培训仿真系统架构的主要层次。在系统架构中，三维建模是电网培训仿真系统实行虚拟培训的基础。利用MultiGen Creator软件完成模型构建后，再建造出模型数据库。构建的模型能够有效地展示出电网安全培训虚拟场景，便于变电站运行人员在培训过程中对电网的分析及理解。

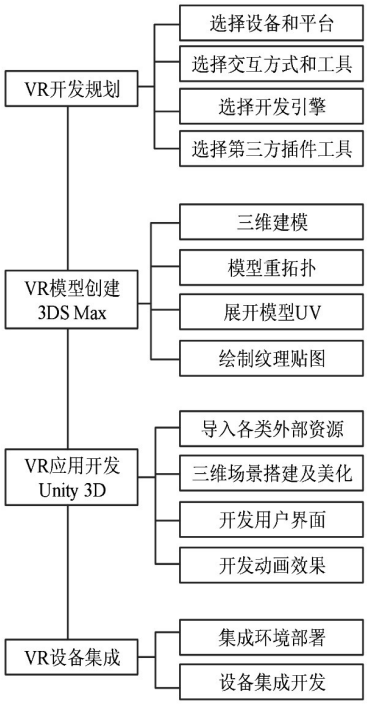



图1 VR应用端开发流程图

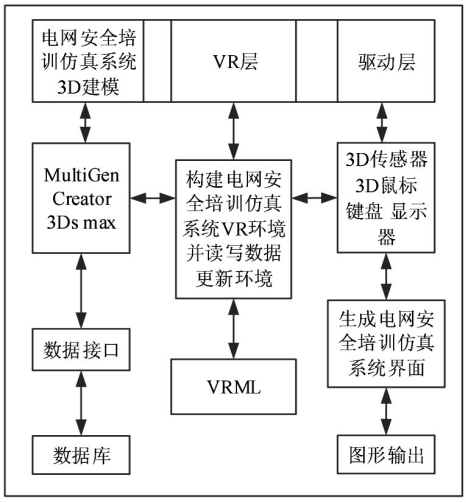



图2 基于虚拟现实的电网安全培训仿真系统软件架构

(2) 在一个虚拟的电网安全培训仿真系统中，除了要建立出3D电网场景模型外，还需要设计一个人机界面[7]，该界面可以有效地展示出变电站运行人员在培训过程中实施的各种操作，例如对电网的抢修、电力系统的元件组合、系统元件与其余元件的关联展示等。用户通过人机交互界面操控需要培训的电网安全内容，达到电网安全培训的目的。

建立完成的三维场景[8]会给培训人员带来冲击感，因为除了三维场景外，系统还会将三维动画[9]与培训的交

互性虚拟场景相融合，使培训人员在场景内就能获取必要的知识，还可以在虚拟场景内操作电网，得到较好的教学效果。

## 2 基于虚拟现实的电网安全培训仿真系统软件设计

### 2.1 虚拟现实体感交互设备设计

电网安全培训仿真系统采用Kinect-forWin Dows作为虚拟现实的交互设备。Kinect是一种具有实时全身追踪、动作捕捉、图像识别、麦克风输入、语音识别等技术的技术。学员在Kinect之前所做的一切都会实时显示在电脑屏幕上，并且会实时显示。体感交互设备结合了Kinect和Unity 3D，大大提升了电网安全培训的体验感。

虚拟现实体感交互设备的集成包括两个阶段：集成环境的部署和设备的集成。集成环境中的部署步骤需要在培训师使用的 PC上安装Oculus和Kinect设备驱动程序和SDK包；部署第三方KinectAndUni以支持Unity和Kinect的集成。在设备集成过程中，由于Unity兼容Oculus模式，因此无需对各种3D模型进行特殊处理。Oculus启动后，Unity会自动切换到Oculus模式，但必须为Oculus摄像头动态添加一个区域，以便能够识别UI的内容。虚拟现实设备集成的核心是基于KinectAndUnity的第三方插件。Kinect可以获取人体运动的坐标，利用KinectAndUnity利用运动点坐标在KinectAndUnity中进行个体手势指令，从而实现电网安全培训仿真的体感交互。

在Kinect坐标系中，提取电网培训系统用户的动作姿势特征点的位置，设相邻的两个动作姿势特征点分别为$(x_0,y_0,z_0)$和$(x_1,y_1,z_1)$，则对应的特征矢量值为：

$$n=(x_0,y_0,z_0)-(x_1,y_1,z_1) \tag{1}$$

这个向量集是一个动作姿态特征描述符，可以唯一地表示一个人体动作姿态。

设标准姿势特征描述符中某一特征矢量为$b=(x_s,y_s,z_s)$，计算标准姿势和实时姿势之间的差异程度：

$$b_s=\sum_{i=0}^{3}b_i \tag{2}$$

由于特征向量之间的角度值$b_i$并不相同，因此通过为每个特征向量之间的角度值$b_i$分配不同的权重值来补偿这种差异。每个角度值权重的计算公式如下。

$$\omega_i=\frac{1-e^{\frac{b_i}{b_s}}}{1-e^{-\frac{b_i}{b_s}}} \tag{3}$$

根据上述公式能够得到一个权重集合，并且，特征矢量间的角度值$b_i$越大，它被赋予的权重值$\omega_i$也就越大。根据各特征矢量间的角度值及其对应的权重值，可以得到一个归一化的角度值：

$$K=\sum_{i=0}^{3}b_i\cdot w_i \tag{4}$$

根据上面计算的归一化角度值参数，它唯一地表示标准位姿和实时位姿之间的差异程度。在这里，引入Kinect的静态人体姿态评分公式，将该值纳入姿势匹配识别准确率的公式中。如下所示：

$$W=\begin{cases}f(\alpha_{max})\cdot[K\cdot\dfrac{100-W_x}{K_x}+S_x]0\le K\le K_{st}\\0K>K_s\end{cases} \tag{5}$$

姿势匹配识别准确度$W$的取值范围为[0,100]，标准姿势和实时姿势的匹配度越高，$W$的值越大。在上述公式中，$K_s$值越小，姿势匹配准确度的判别越严厉，可以通过参数$K_s$，根据实际需要将姿势匹配识别准确度$W$控制在合适的范围内。

以此，通过上述过程完成基于Kinect的人体动作特征智能识别，进而实现电网安全培训仿真的体感交互。Kinect人体动作特征识别流程图如图3所示。

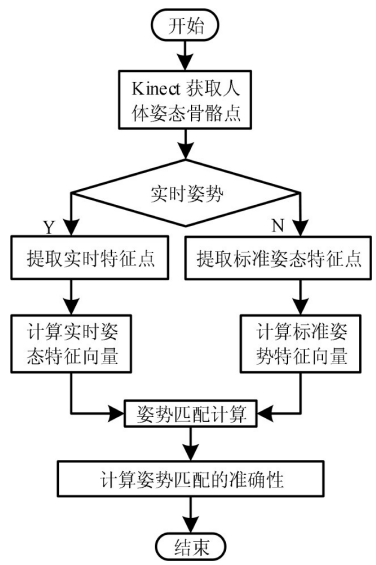



图3 Kinect人体动作特征识别流程图

### 2.2 电网安全培训仿真系统软件体系设计

电网安全培训仿真系统中，系统的整体软件体系在系统中占据着主要地位，因此需要设计出系统软件体系，那么设计出的系统软件体系示意图如图4所示。

根据图4可知，在设计的电网安全培训仿真系统整体软件体系中，共分为6层，各个层次之间所连接的设备及功能均有所不同，所以各个软件层展现的价值也不相同。

在系统层中，主要利用开发工具及引擎对安全培训仿真系统实行开发，以三维图形引擎为基础，实现虚拟仿真环境。系统层经常应用的软件开发工具分别为Qt和微软。

而工具层是系统仿真建模的主要工具软件。在电网3D建模的基础上，可以研究出安全培训画面编辑器，利用基本图形与培训人员自定义的图形元素，迅速编辑出能

够生成的电网安全训练画面，这样在实行电网安全培训实操时，就可以根据编辑的画面判断培训人员的对错。

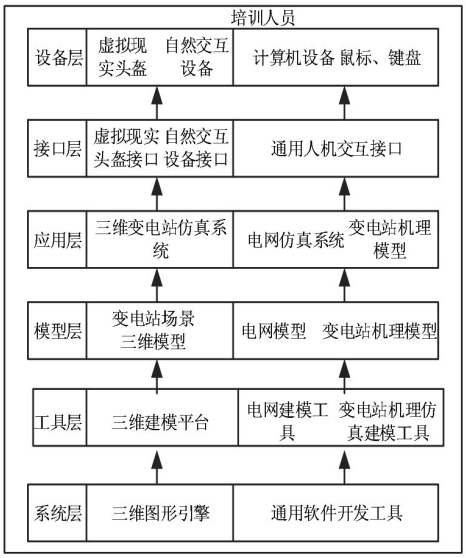



**图4 软件体系设计**

系统模型层可以映射系统需要运行的数据，有利于人员的观察及分析[10]。

## 3 电网安全培训仿真系统组成模块设计

### 3.1 日常培训功能模块

培训人员、考核调度人员、电网运行人员及管理人员都是电网安全培训仿真系统中不可或缺的一部分，不仅能够对人员实施辅助培训，还可以检测电网运行状态。根据专业的知识理论，培训人员需要利用系统功能培训学员。因而首先需要设计出日常培训功能模块，具体设计如图5所示。

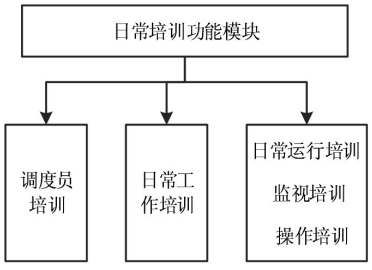



**图5 日常培训功能模块示意图**

通过图5可知，在日常培训功能模块中总共具有三个功能。培训电力人员时，除了要对变电站运行人员培训外，还需要培训电网调度员。培训的内容大致为：电网监视、电网的调度、电网数据分析等。当系统调整电网数据后，系统就需要根据调整的电网控制电压。

电网日常运行培训完成后，就要进一步升级培训内容，训练变电运行人员的监视工作。电网在运行期间需要有人不断值班监视电网运行情况，包括电网中的母线、变压器、功率等，这些运行数据都会在计算机中显示，而监视人员在监视前，应学会读取电网数据及各类监视设备的信号。这样电网出现故障后，监视人员能够及时发现故障。

### 3.2 缺陷培训功能模块

电网运行时极易发生故障，针对电力设备的异常原因，训练电网运行人员，因而设计出缺陷培训功能模块，设计结果如图6所示。

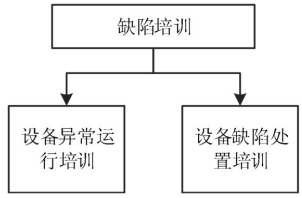



**图6 缺陷培训功能示意图**

造成电力设备异常的原因有很多种，比如电网变压器的温度过高、变压器的负荷过大，这都会导致电力设备出现异常，所以需要利用人工处理异常发生状况。电网设备出现异常后，系统就会自动发出告警信号，甚至是故障画面也会展现出来，针对不同的情况所对应的应对措施皆有不同，需要一一培训受训人员。

### 3.3 仿真培训控制功能模块

在仿真培训时，外界人员要及时控制培训进程，所以设计仿真培训控制功能，具体设计示意图如图7所示。

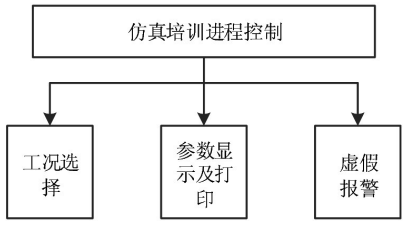



**图7 仿真培训进程控制功能示意图**

在培训前要通过工况选择功能对要培训的内容及计划开启设定及选择，再步入培训状态。培训时可以对任意工况内容实行存储、暂停、返回及重新演示等。重新演示培训内容时，人工操作不能干预到培训状态。

根据设计的软件及模块功能，成功设计出具有虚拟效果的电网安全培训仿真系统，实现基于虚拟现实的电网安全培训仿真系统设计。

## 4 实验与分析

为了验证基于虚拟现实的电网安全培训仿真系统设计方法的整体有效性，需要对该方法进行实验对比测试。

采用基于虚拟现实的电网安全培训仿真系统设计方法(方法1)、城市轨道交通行车作业虚拟仿真实训系统的设计与应用方法(方法2)和基于ISD模型的福建省医养护理员培训体系设计探索方法(方法3)实验测试。基于虚拟

现实的电网安全培训仿真系统界面如图8所示。

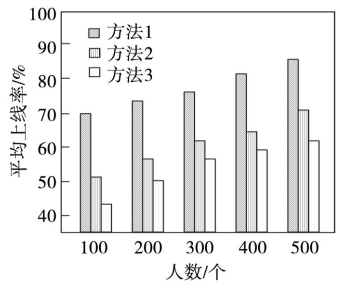



图8 基于虚拟现实的电网安全培训仿真系统界面

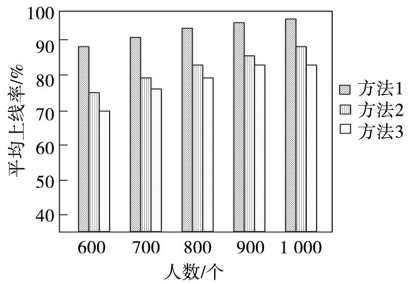
在电网安全培训仿真系统中能够生成电网安全培训虚拟场景，如图9所示。



图9 仿真培训系统虚拟场景




(a) 100~500人的平均上线率测试



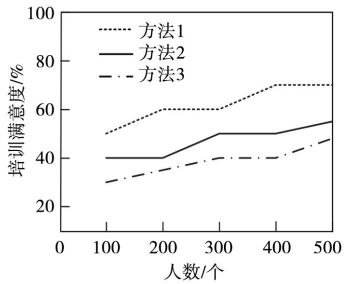

(b) 600~1 000人的平均上线率测试

图10 平均上线率测试

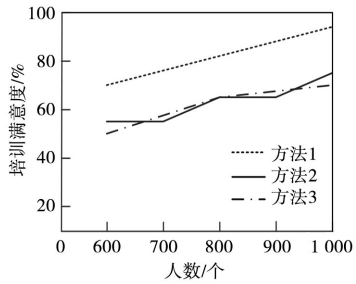
(1) 电网安全培训仿真系统设计完成后，需要验证该系统在培训期间的实施效果，因而选取广东电网公司作为本次研究对象，在该公司内选取1 000人，累积这1 000人在电网安全培训仿真系统中的平均上线率，利用方法1、方法2和方法3分别测试系统的平均上线率。根据实验结果验证系统实际培训效果，平均上线率越高，代表实际培训效果越好，表明电网安全培训仿真系统设计得越佳。具体测试结果如图10所示。

根据图10(a)及图10(b)可以看出，三种方法的平均上线率都随着人员的增加而不断提升，当测试人员为100人时，可以清晰地看出方法1的平均上线率要高于方法2和方法3，甚至人员不断增加后，方法1的平均上线率也始终居于首位。因而可以得知，方法1的平均上线率最高。验证了方法1的实际培训效果要比方法2和方法3的好，所设计的系统效果佳。

(2) 根据上述平均上线率测试，利用方法1、方法2和方法3测试人员的培训满意度，依据培训满意度验证该方法的培训效果。培训满意度越高，说明该方法的培训效果越优，培训满意度越低，说明该方法的培训效果越差。测试结果如图11所示。




(a) 100~500人的培训满意度测试




(b) 600~1 000人的培训满意度测试

图11 培训满意度测试

分析图11中的数据可知，前100人测试时，方法2和方法3的培训满意度都没有达到50%，而与方法2和方法3相反的是，方法1在前500人测试时其运动轨迹就要高于方法2和方法3，且培训满意度早已超出50%，由此证明了方法1的培训效果最优。

这主要是因为方法1设计了缺陷培训功能模块，该模块可以使受训人员实行多种培训训练，令受训人员能够在电网不同异常情况下实操，以此检验自身的学习成果，大大地提升了训练效率，增强培训效果。所以在600～1 000人测试期间，方法1的培训满意度依旧最高。这也验证了方法1的电网安全培训仿真系统设计效果最佳。

## 5 结束语

由于变电站的电力供求逐渐加大，导致电网运行人

(下转第114页)