

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190846

# AR 增强现实技术在变电站二次设备运检中的应用

简学之<sup>1</sup>, 刘子俊<sup>1</sup>, 文明浩<sup>2</sup>, 张惠仙<sup>3</sup>

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 3. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 为了解决传统电力二次设备的运检工作中存在的重复性强、人员效率低且易出错等不足, 采用 AR 增强现实技术, 构建了包含标准化作业指导库和运检资源库的二次设备运维系统。引入 A-KAZE 特征提取算法, 结合聚类分析和点集验证的算法, 通过 OpenCV 源码的实现来发挥其在图像辨识、虚实影像叠加、智能纠错判断、手势语音交互等方面的技术优势。AR 智能终端设备捕捉被检查设备的信息后, 通过与后台信息数据库的比对可实现自动排查设备异常等功能, 并可实时记录现场的运检数据。在变电站二次设备运检中的应用结果表明, 所构建的系统, 规范了运检操作流程, 实现了无纸化操作, 提高了变电站二次设备巡检工作效率和识别准确率。

**关键词:** 增强现实; 变电站; 二次设备; 运检; 图像识别

## Application of operation and maintenance of intelligent substation equipment based on augmented reality technology

JIAN Xuezhi<sup>1</sup>, LIU Zijun<sup>1</sup>, WEN Minghao<sup>2</sup>, ZHANG Huixian<sup>3</sup>

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 3. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** The operation and maintenance inspection of traditional power equipment has the characteristics of high repeatability, low staff efficiency and of being error-prone. An operation and maintenance system of secondary equipment based on Augmented Reality (AR) technology is constructed. It includes the standardized operation guidance database and the operation inspection resource database. A-KAZE feature extraction algorithm is introduced and clustering analysis and point set verification are combined to give full play to the technical characteristics of the operation and maintenance system of secondary equipment in image recognition, virtual and real image overlay, intelligent error correction judgment and gesture voice interaction via the implementation of OpenCV source code. After capturing the information of the inspected equipment, the AR intelligent terminal equipment can automatically detect abnormal equipment by comparing the call with the background information database. It can also record the on-site inspection data in real time. The application results in the operation and inspection of secondary equipment in a substation show that, the constructed system standardizes the operation process of transportation inspection, realizes paperless operation, and improves the inspection efficiency and identification accuracy of secondary equipment in a substation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477061).

**Key words:** augmented reality; substation; secondary equipment; operation and maintenance; image recognition

## 0 引言

为保证电力设备的稳定、可靠运行, 变电站站内设备的例行巡检成为保证电网安全运行的关键

技术手段<sup>[1]</sup>。其中变电站电力二次设备如开关把手、线序、端子排类、压板、指示灯等每月至少需要巡检一次<sup>[2]</sup>, 目前“纸质+人工核对”的巡检方式存在易疲劳、易出错、耗工时、效率低等问题<sup>[3]</sup>。

近年来, 基于虚拟现实(Virtual Reality, VR)和增强现实(Augmented Reality, AR)技术的智能可穿戴

设备在电力行业陆续得到应用,为该问题提供了新的解决思路。电网中 VR 技术的应用,是利用智能计算设备模拟产生在三维空间内的虚拟变电站、电力设备等场景,提供使用者在视觉、听觉以及触觉等感官上的身临其境的交互体验,多用于涉及高危、高成本或高消耗等场合下的电力运维巡检<sup>[4-6]</sup>。AR 技术,是在现实世界中叠加一定时间和空间范围内难以体验的实体信息(视觉信息、声音、味觉、触觉等),并将该信息应用于现实世界,并由用户的感官识别的技术,它能够获得超越现实的交互体验,为电力运维检修的大量重复性工作提供技术支持<sup>[7-10]</sup>。但基于 AR 的变电站二次设备的运检等相关技术研究尚未系统开展。如何结合 AR 技术提高电力二次设备日常运检工作效率,成为新的研究目标。

本文提出了一种基于 AR 技术的二次设备运维系统,引入了 A-KAZE 特征提取算法,结合聚类分析和点集验证的算法<sup>[11-12]</sup>,通过 OpenCV 源码的实现,发挥 AR 技术在图像辨识、虚实影像叠加、手势语音交互,智能纠错判断等方面的技术优势,通过 AR 智能终端设备获取的二次设备的信息,与系统中的标准化作业指导库和运检资源库进行比对后,可通过语音、叠加有标识图像等提示方式,实现运检过程中的实时 AR 辅助。基于增强现实技术的二次设备运维系统可预置二次设备运维策略和表单,在 AR 智能终端设备的辅助下,运检数据可实时传送到平台管理数据库,提高了二次设备的巡检效率,减少了人工记录和输入系统的工作量。

### 1 系统设计

本系统利用三维建模技术为开关把手、线序、端子排类、压板、指示灯等二次电气设备创建模型,同时利用增强现实技术和数据库技术建立丰富的标准化作业指导库和运检资源库,应用于二次设备的运维策略,能够有效地利用 AR 智能设备的图像辨识、智能纠错和流程指引技术,从而提高运检的安全和效率。

该系统整体框架由在运检现场穿戴的 AR 智能设备、安装在变电站内服务器端的平台管理系统和 AR 二次设备运维系统以及在巡检过程中的使用的传感设备四部分组成。

系统总体设计的设备运维模型的交互过程,如图 1 所示,交互过程的具体描述如下。

1) AR 智能设备通过用户鉴权登录服务器端的平台管理系统、获取语音交互定制化配置及设备基本参数;

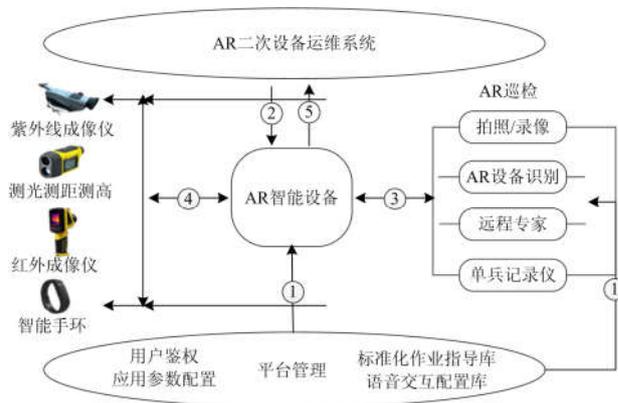


图 1 AR 运检交互流程图

Fig. 1 AR operation inspection interaction flow chart

2) AR 智能设备接受 AR 二次设备运维系统下发的巡检任务;

3) 使用 AR 智能设备的拍照/录像、设备识别、远程专家和单兵记录仪等功能模块执行巡检任务;

4) 根据 AR 智能设备的策略指引并应用紫外线成像仪、测光测距测高仪、红外成像仪和智能手环等传感设备接收巡检指令、回传巡查信息。

5) AR 智能设备作为数据接收传送的计算单元及纽带,实时接收、计算、传送压板状态、端子排和指示灯等各类巡检数据,如位置、音视频、照片等信息至 AR 二次设备运维系统,记录并存储用户的所有作业流程数据以便后期查阅分析。

根据图 1 所示交互流程,为满足《电力行业网络与信息安全管理办法》的各项要求,本系统在用户方实施时一般需要进行严格的私有化部署,系统结构如图 2 所示。

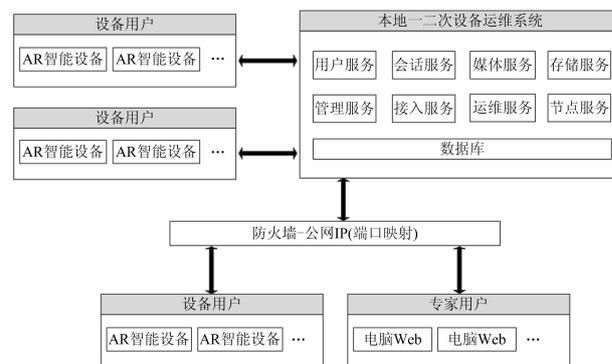


图 2 系统部署结构图

Fig. 2 Structure of system deployment

根据系统部署结构图显示,将系统服务端和数据库部署在用户指定的服务器上,提供运维资源支持。在本地局域网内,用户可通过 AR 智能设备和电脑 web,使用系统的各个功能进行运检作业,若用

户有在公网访问系统的需求,则必须把服务器对应的本地局域网映射到互联网的公网 IP,需要支持跨区域和跨国通信,需要单独在其他区域或者国家部署节点服务器,这样可以保证系统数据安全。

## 2 AR 二次运维系统关键技术实现

AR 增强现实技术在变电站运检过程中应用的关键包括设备图像或设备 ID、二维码的识别、目标跟踪以及人机交互技术等多个方面。AR 技术将虚拟场景整合到现实环境中来,通过 AR 智能设备的摄像头识别到视觉范围内的电力设备后,来建立现实空间的坐标系。通过系统检索模型数据库识别并显示该设备相关的影像信息。

### 2.1 图像识别技术

在变电站现场运检过程中对二次设备部件的识别,包括场景的识别和具体部件目标识别。场景识别用于确定需运检的具体设备以及运检任务信息等;具体部件目标识别则主要是获取需运检二次设备的状态和数值等信息<sup>[13-17]</sup>。具体的可将图像识别类型划分为,如开关把手、线序、端子排类的多状态识别;指示灯、线鼻子类的小目标识别以及文字识别范畴的保护定值单识别等。

目前广泛采用的基于图片指纹的哈希算法<sup>[18]</sup>,只适用于静态图片的识别,用来做 AR 脱卡识别检索,而现实环境中不同的光照、目标图像拍摄角度和 251705344 姿态等因素,都会严重影响图像自身的哈希值,进而影响识别的性能和质量。由此本文采用一种更稳定、性能更好的特征检测算法, A-KAZE(Accelerated KAZE Features)特征提取算法<sup>[19]</sup>,整个匹配流程采用特征提取结合 K-Means 树来求近似最近邻匹配的算法,对匹配到的关键点求单应性映射,最后根据局内(inlier)点集进行打分的方式来判定识别到的目标。

#### 2.1.1 图像特征

图像识别的图像特征,指在电力设备识别时图像中能够唯一标示,区别于其他图像的部分,具有可重复检测性的特性,即同一图像在不同的角度,位置,姿态和环境亮度情况下,所提取的特征应该是相同的<sup>[20-21]</sup>。图像特征是图像分析算法的起点,常用的图像特征包含:

- 1) 颜色特征,全局特征,描述图像或图像区域所对应景物的表面性质。如指示灯状态等。
- 2) 纹理特征,全局特征,描述图像或图像区域所对应景物的表面性质。如液晶装置。
- 3) 形状特征,局部特征,描述了局部区域内物体的外形性质。如开关状态等。

4) 空间关系特征,是指图像中分割出来的多个目标之间的相互的空间位置或相对方向关系。如线序等。

#### 2.1.2 A-KAZE 算法

A-KAZE 算法采用非线性方式扩散滤波法<sup>[22]</sup>,将图像亮度(L)在不同尺度上的变化视为某种形式的流动函数(flow function)的散度(divergence),可以通过非线性偏微分方程来描述:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = \text{div}(c(x, y, t)\nabla L) \quad (1)$$

通过设置传导函数  $c(x, y, t)$ ,可以使扩散算法自适应于图像局部,时间  $t$  为尺度参数,其值越大,图像的表达形式越简单,传导函数设置公式如下:

$$\begin{cases} c(x, y, t) = g |\nabla L_{\sigma}(x, y, t)| \\ g = \frac{1}{1 + \frac{|\nabla L_{\sigma}|^2}{k^2}} \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)中的非线性微分方程可知,随着时间  $t$  的推移,图像  $L(x, y, t)$ 也在进行变化,由此构成非线性尺度空间。且事件证明非线性尺度空间不会像线性尺度空间那样模糊图像。

在 OpenCV 中封装了 A-KAZE 算法的特征检测器,可直接 creat 一个 A-KAZE 特征检测器,来对图像进行特征提取、描述子生成等操作,得到的描述子具有旋转、尺度、光照、空间不变性等特点,而且其鲁棒性、特征独特性和特征精度更好。

#### 2.1.3 聚类分析算法

采用特殊的聚类分析的算法 K-Means,目的是把图像提取的  $n$  个点划分到  $k$  个聚类中,使得每个点都属于离他最近的均值(即聚类中心)对应的聚类,并以此作为聚类的标准<sup>[23]</sup>。

K-Means 算法主要解决的问题,描述为将图 3 中左边我们用肉眼可以分辨的四个点群,在计算机程序中标识。

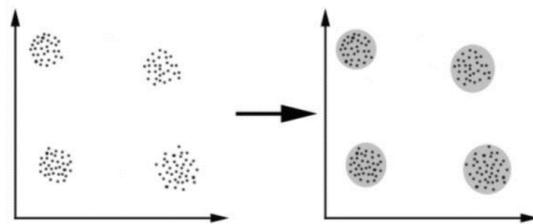


图 3 K-Means 算法解决的问题

Fig. 3 Problems solved by K-means algorithm

#### 2.1.4 点集验证

采用 OpenCV 中的 RANSAC 算法<sup>[24-25]</sup>解决验

证的问题, 与普通的去噪算法不同, RANSAC 算法是用最少的点来估计模型参数, 然后尽可能的扩大得到的模型参数的影响范围。具体描述是: 给定  $N$  个数据点组成的集合  $P$ , 假设集合中大多数的点都可以通过一个模型来产生的, 且最少通过  $n(n < N)$  个点可以拟合出模型的参数。通过以下的迭代方式拟合该参数。对下面的操作执行  $k$  次以后, 选择  $m$  最大的模型  $M$  作为拟合的结果:

- (1) 从  $P$  中随机选择  $n$  个数据点;
- (2) 用这  $n$  个数据点拟合出一个模型  $M$ ;
- (3) 对  $P$  中剩余的数据点, 计算每个点与模型  $M$  的距离, 距离超过阈值的则认定为局外点(及 outlier 点), 不超过阈值的认定为局内点(及 inlier 点), 并记录该模型  $M$  所对应的局内点的值  $m$ 。

以上为 AR 识别追踪流程原理, 通过 OpenCV 源码的实现, 在模型的内部保存了整个网络的权重值。当输入新的图片后, 即可根据该权重参数对图片进行处理, 完成对图片的目标检测。系统识别方法示意图如图 4 所示。

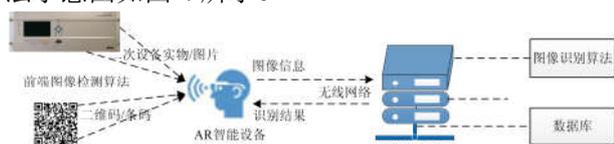


图 4 系统识别方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of system identification method

## 2.2 基于 AR 的人机交互技术

人机交互技术是基于目前 AR 智能设备的硬件特点, 结合语音或用户肢体手势等识别算法<sup>[26-27]</sup>, 将用户的交互操作输入到设备中, 经过计算将交互结果输出并显示在设备上。目前 AR 人机交互的方式主要包括:

1) 凝视, 主要是对用户眼球运动的跟踪, 如第二代 Hololens 设备, 结合模式识别、角膜反射点分析、眼球形状分析和用眼模式分析等方法, 但受眼睛的张开程度和眼球大小变化等因素影响较大<sup>[28]</sup>, 在现场运检过程中, 头戴 AR 智能设备的运检人员可通过凝视特定设备, 识别设备的状态变化;

2) 手势交互, 通过设定的手势动作和状态作为输入, 对设备进行移动、拖拽和操作等, 基于 AR 技术的运维培训, 头戴 AR 智能设备的使用人员可通过手势动作, 对三维虚拟压板、开关等设备模型进行检修操作培训;

3) 语音交互, 识别输入的语音, 触发响应的方式, 在现场运检过程中, AR 智能设备开启流程指引功能, 运检人员可通过语音“进入下一步”, 来获

取设备的操作提示。语音交互可以解放用户的双手, 成为 AR 技术应用过程中直接且有价值的工作。

本系统结合以上多种交互方式, 实现变电站二次设备现场运检过程中的操作、流程指引和事故预警提示等功能。

## 3 AR 二次设备运维系统的应用

在变电站二次设备现场运检过程中, 基于 AR 的二次设备运维系统的具体应用主要包括以下四个方面。

### 3.1 实物图像或二维码识别

通过研究二次设备实物或二维码标签识别的算法, 满足 AR 智能设备可在不同角度扫描, 均能达到立体识别并完成数据提取和展示的效果。

通过 AR 智能设备扫描装置标签或图像, 可自动展示设备的出厂信息、运维检修信息、柜内设备的三维可视化展示信息、或二次电缆起点、终点以及功能描述信息。如图 5 所示, 进一步加强继电保护和自动装置、通信设备精益化管理水平, 实现设备全寿命周期内信息共享应用。为继电保护运维管理工作带来便捷, 提高现场作业的效率。



图 5 扫描装置标签 AR 智能眼镜展示效果

Fig. 5 Display effect of scanning device label in AR glasses

在传统的电力设备巡检中, 检查压板、状态灯的状态, 现场人员需要拿纸去记录, 一次运检需要至少两个人, 利用 AR 智能设备扫描设备图像, 可快速识别压板、指示灯、空气开关等二次设备的状态变化, 并通过增强现实技术叠加标记, 在 AR 智能设备中进行展示。识别结果展示如图 6 所示。

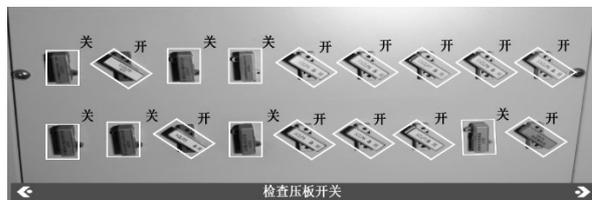


图 6 运维系统识别结果展示

Fig. 6 Display of operation and maintenance system identification results

### 3.2 信息叠加、流程指引

佩戴 AR 智能眼镜进行现场巡检作业，根据二次设备回路检验及装置调试逻辑进行运维，在 AR 智能眼镜中可以查看巡检工作流程的指引提示，运检作业流程可具体包括，外观检查，保护定值、版本与校验码核对；二次回路绝缘检查；反措执行情况检查；单装置调试；开关本体信号回路检查；线路保护关联回路检查；保护通道及接口装置的检验；整组传动；端子紧固等工作，如图 7 所示。

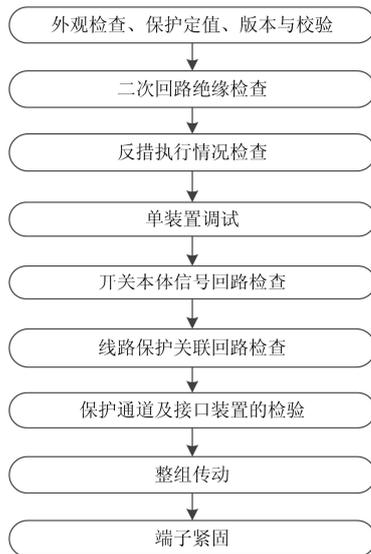


图 7 运检工作指引流程图

Fig. 7 Operation and maintenance work flow chart

### 3.3 远程专家功能

运检任务执行过程中可启动远程专家功能，如图 8 所示，获取远程专家的实时技术指导；也可根据 AR 二次设备运维系统提示依次进行设备操作直至该次运维任务结束，如图 9 所示。

### 3.4 数据视频资料管理

运检任务作业过程通过 AR 智能眼镜的实时通讯传输功能，在监控端(专家端)可全程查看现场第一视角的数据和视频，进行截图，并在截图上进行信息标注等编辑操作，实时回传给现场运维人员，对现场运检人员进行实时技术指导；而且可以进行

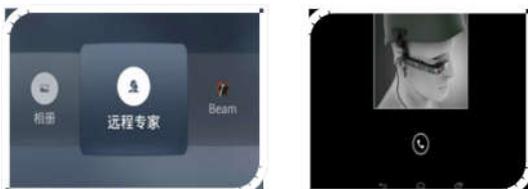


图 8 远程专家功能启动展示图

Fig. 8 Remote expert function startup display



图 9 开关状态恢复流程

Fig. 9 Switch state recovery process

视频关键点标示、关键数据打点、监控端备份和生成巡检记录表单操作，通过这些数据和视频资料的收集与分析，实现预防和实时解决问题式的智能化管理。

在深圳供电局基于 AR 的二次设备运维技术应用研究项目中的应用结果表明，本文涉及的基于 AR 的二次设备运维系统，利用 AR 智能设备来解放双手，借助增强现实技术的图像识别、图像叠加、流程指引、升级第一视角远程指导、多媒体双向指导、知识库实时积累等功能，提供全方位、多通道的运检解决方案，规范了运检操作流程，解放了运维人员的双手，实现了无纸化操作，提高了变电站二次设备巡检工作效率和识别准确率，具有重要的现实意义和应用价值。

## 4 结论

本文介绍了基于 AR 增强现实技术的变电站二次设备运维系统及其在现场运检工作辅助方面的应用。该系统采用 AR 增强现实技术，构建了标准化作业指导库和运检资源库，引入了 A-KAZE 特征提取算法，结合聚类分析和点集验证的算法,通过 OpenCV 源码的实现，发挥增强现实技术在图像辨识、虚实影像叠加、智能纠错判断、手势语音交互等方面的技术优势,用于运维人员的巡检工作辅助，可克服传统运维巡检工作中操作繁琐、人员效率低易出错造成人为故障、突发紧急情况无法快速处理等缺点，提高了现场作业的安全性与规范性；并可不受空间和时间限制的获取领域内的专家指导，快速解决现场问题避免损失；同时，也可大幅减少人工记录的输入输出等相关工作量，提高运检工作效率和准确率。

## 参考文献

- [1] 蔚然, 戚琳, 戚矛, 等. 智能机器人巡检系统在 500 kV 文都变的应用[J]. 电工技术, 2014(6): 9-10, 39.  
WEI Ran, QI Lin, QI Mao, et al. Application of AR identification technology in operation inspection of secondary equipment in substation[J]. Electrical Engineering, 2014(6): 9-10, 39.
- [2] 刘勇, 陈海滨, 刘方. 基建现场巡检无人机智能感知系统的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 155-161.  
LIU Yong, CHEN Haibin, LIU Fang. Research and application of intelligent perception system for unmanned aerial vehicle inspection at construction site[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 155-161.
- [3] 张可, 田峰, 段晓雪, 等. 智能变电站故障检修系统运维技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(10): 56-61.  
ZHANG Ke, TIAN Hao, DUAN Xiaoxue, et al. Research on operation and maintenance technology of intelligent substation fault maintenance system[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(10): 56-61.
- [4] 王廷凰, 简学之, 刘子俊, 等. 基于虚拟现实技术的电力设备运维培训系统的实现与应用[J]. 南方电网技术, 2018, 12(10): 61-66.  
WANG Tinghuang, JIAN Xuezhi, LIU Zijun, et al. Implementation and application of intelligent substation operation and maintenance training system based on virtual reality technology[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(10): 61-66.
- [5] 史耕金. 虚拟现实在发电机检修培训系统设计中的应用[J]. 计算机仿真, 2017, 34(7): 170-173.  
SHI Gengjin. The application of virtual reality in generator maintenance training system design[J]. Computer Simulation, 2017, 34(7): 170-173.
- [6] 王聪. 增强现实与虚拟现实技术的区别和联系[J]. 信息技术与标准化, 2013(5): 57-61.  
WANG Cong. The difference and connection between augmented reality and virtual reality[J]. Information Technology & Standardization, 2013(5): 57-61.
- [7] 韩海韵, 彭林, 陈晰. 增强现实技术最新进展及其在电网的应用前景[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(3): 26-33.  
HAN Haiyun, PENG Lin, CHEN Xi. A survey on state-of-the-art augmented reality and its applications in power system[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(3): 26-33.
- [8] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [9] 郝腾飞, 李军锋, 李晓莹, 等. 三维虚拟仿真技术在电力设备设计中的应用[J]. 现代电子技术, 2018, 41(14): 51-54.  
HAO Tengfei, LI Junfeng, LI Xiaoying, et al. Application of 3D virtual simulation technology in power equipment design[J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(14): 51-54.
- [10] CAO Jiqing. Research and design of operation and maintenance of digital factory system based on VR/AR technology[C] // Proceedings of 2016 4th International Conference on Electrical & Electronics Engineering and Computer Science (ICEECS 2016), Computer Science and Electronic Technology International Society, October 15, 2016, Jinan, China: 951-956.
- [11] 邓丽, 鲁琛瑶, 邵宇鹰, 等. 增强现实技术在电力系统故障源标识中的应用[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(10): 2386-2391.  
DENG Li, LU Chenyao, SHAO Yuying, et al. Application of augmented reality technology in fault source identification of power system equipment[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(10): 2386-2391.
- [12] 何明, 陈莹莹, 张斌, 等. AR 技术在配电站房巡检业务中的应用研究[J]. 现代信息科技, 2019, 3(1): 175-176.  
HE Ming, CHEN Yingying, ZHANG Bin, et al. Application of AR technology in patrol service of distribution station buildings[J]. Modern Information Technology, 2019, 3(1): 175-176.
- [13] 苗俊杰. 智能变电站二次系统高可视化全景调测平台的设计[J]. 现代电子技术, 2018, 41(9): 170-174, 178.  
MIAO Junjie. Design of high-visualization panoramic measurement platform for intelligent substation secondary system[J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(9): 170-174, 178.
- [14] 陈春霖. 面向智能电网的信息安全主动防御保障体系建设[J]. 中国信息安全, 2016(11): 54-57.  
CHEN Chunlin. Construction of information security active defense guarantee system for smart grid[J]. China Information Security, 2016(11): 54-57.
- [15] 陈哲, 臧富锋, 刘园伟, 等. 基于设备自锁定技术的二次设备就地运维方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 156-161.  
CHE Zhe, ZANG Fufeng, LIU Yuanwei, et al. A method of local operation and maintenance for secondary equipment based on equipment self locking technology[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 156-161.
- [16] 张丰, 郭碧媛, 朱菁, 等. 电力设备培训仿真系统的研

- 研究与开发[J]. 山东电力技术, 2016, 43(7): 38-41.  
ZHANG Feng, GUO Biyuan, ZHU Jing, et al. Research and development of intelligent substation training simulation system[J]. Shandong Electric Power Technology, 2016, 43(7): 38-41.
- [17] 李志海. 数字化三维变电站设计技术研究[J]. 电气技术, 2015, 16(11): 83-86.  
LI Zhihai. Research on 3D digital substation design technology[J]. Electrical Technology, 2015, 16(11): 83-86.
- [18] HU Zhuangli, HE Tong, ZENG Yihui, et al. Fast image recognition of transmission tower based on big data[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 149-158. DOI: 10.1186/s41601-018-0088-y.
- [19] 李军锋, 王钦若, 李敏. 结合深度学习和随机森林的电力设备图像识别[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3705-3711.  
LI Junfeng, WANG Qinruo, LI Min. Electric equipment image recognition based on deep learning and random forest[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3705-3711.
- [20] 李军锋, 何双伯, 冯伟夏, 等. 电力设备智能巡检中增强现实(AR)技术的应用研究[J]. 电工技术, 2018(3): 96-97.  
LI Junfeng, HE Shuangbo, FENG Weixia, et al. Application research of augmented reality (AR) technology in intelligent inspection of power equipment[J]. Electric Engineering, 2018(3): 96-97.
- [21] 谢维兵, 敬勇, 刘敏, 等. 增强现实(AR)技术在电网培训中的运用[J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2018, 23(1): 43-45.  
XIE Weibing, JING Yong, LIU Min, et al. A study on the application of ar technologies in the training in the power grid[J]. Journal of Chongqing Electric Power College, 2018, 23(1): 43-45.
- [22] 周封, 任贵新. 基于颜色空间变量的输电线图像分类及特征提取[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 89-98.  
ZHOU Feng, REN Guixin. Image classification and feature extraction of transmission line based on color space variable[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 89-98.
- [23] 刘庆珍, 张晓燕, 蔡金锭. 基于降维技术与K-means聚类的油纸绝缘状态综合灰评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 62-70.  
LIU Qingzhen, ZHANG Xiaoyan, CAI Jinding. Comprehensive grey evaluation for oil-paper insulation based on dimension reduction techniques and K-means cluster[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 62-70.
- [24] 于科为. 基于卷积神经网络的工件缺陷检测研究[J]. 信息与电脑, 2018(21): 7-9, 12.  
YU Kewei. Research on defect detection of workpiece based on convolutional neural network[J]. Communication & Computer, 2018(21): 7-9, 12.
- [25] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2017, 39(6): 1137-1149.
- [26] HAYKIN S. Neural networks: a comprehensive foundation[J]. Prentice-Hall, Inc., 2007.
- [27] WERBOS P J. Beyond regression: new tools for prediction and analysis in the behavioral sciences[D]. Cambridge: Harvard University, 1975.
- [28] 宋一凡, 张鹏, 刘立波. 基于视觉手势识别的人机交互系统[J]. 计算机科学, 2019, 46(增刊 2): 570-574.  
SONG Yifan, ZHANG Peng, LIU Libo. Human-machine interaction system with vision-based gesture recognition[J]. Computer Science, 2019, 46(S2): 570-574.

收稿日期: 2019-07-19; 修回日期: 2020-01-10

作者简介:

简学之(1989—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化、继电保护、智能变电站技术等。E-mail: jianxuezhi@sz.csg.cn

(编辑 姜新丽)