

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201045

智慧变电站联合巡检技术及其应用

张春晓¹, 陆志浩², 刘相财¹

(1. 上海思源弘瑞自动化有限公司, 上海 201108; 2. 国网上海市电力公司, 上海 200122)

摘要: 为了解决目前变电站运维人员对运维智能化、可视化、远程化的需求, 研究了图像采集、图像识别、红外测温与诊断、智能巡检、智能联动、综合诊断、可视展示等关键技术。开发并应用了一种基于人工智能分析技术的联合巡检系统, 包括联合巡检、全面感知、智能联动、诊断分析、综合展示等功能。该系统整合全站多源数据, 通过多种先进传感器和采集设备, 实现设备状态全面感知, 利用激光导航轮式机器人、轨道机器人、固定点位摄像机为核心构建立体巡检体系, 实现智能巡检、智能操作、智能联动、智能安全的目标。通过优化联合巡检策略并应用到国网智慧变电站项目中, 取到了良好效果。

关键词: 智慧变电站, 联合巡检; 图像识别; 智能联动; 综合诊断

Joint inspection technology and its application in a smart substation

ZHANG Chunxiao¹, LU Zhihao², LIU Xiangcai¹

(1. Shanghai SieyuanHongrui Automation Co., Ltd., Shanghai 201108, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: There are many requirements for intelligent, visual and remote operation and maintenance personnel of a substation. To help satisfy these, key technologies such as image acquisition, image recognition, infrared temperature measurement and diagnosis, intelligent patrol inspection, intelligent linkage, comprehensive diagnosis and visual display are studied. A joint inspection system based on artificial intelligence analysis technology is developed and applied, including functions of joint inspection, comprehensive perception, intelligent linkage, diagnostic analysis and comprehensive display, etc. The system integrates multi-source data of the whole station, realizes comprehensive equipment state perception through a variety of advanced sensors and acquisition equipment, uses laser navigation wheeled robots, rail robots, and fixed-point cameras. These form a core for building a three-dimensional inspection system to achieve the goals of intelligent inspection, intelligent operation, intelligent linkage and intelligent security. By optimizing the joint inspection strategy and applying it to the State Grid Smart Substation Project, good results are obtained.

This work is supported by the Science and Technology of State Grid Corporation of China (No. 520940180036) "Research on Secondary System Architecture and Key Equipment of Third-generation Intelligent Substation".

Key words: smart substation; joint inspection; image recognition; intelligent linkage; comprehensive diagnosis

0 引言

随着“大云物移智”等新一代信息技术与电网运维检修业务的深度融合, 物联网、机器人、人工智能等技术在变电站中得到越来越深入的应用^[1], 变电站运维人员对运维智能化、可视化、远程化的需求也越来越突出, 如何将各种新技术和运维人员的

实际需求相结合, 切实解决运维人员痛点, 实现可实用化的智能运维系统, 是当前变电站智能运维面临的挑战。

国家电网公司目前正在推进智慧变电站的试点工作, 智慧变电站运维方式正在探索之中, 本文结合运维需求和关键技术分析, 开发了智慧变电站联合巡检系统, 将变电站视频系统、机器人系统、全站三维系统、辅助监控系统和主设备监视系统有机结合起来, 实现巡检自动触发、状态自动评估、报告自动生成。

基金项目: 国家电网公司科技项目“第三代智能变电站二次系统架构及关键设备研究”(520940180036)

1 运维现状

变电站近年来虽然出现了多种运维系统^[2], 比如变电站辅控系统、室外激光导航机器人巡检系统、室内挂轨机器人巡检系统、三维巡检系统等, 但这些系统分属不同安全大区, 相互之间交互信息很少, 信息孤岛依然存在。变电站辅控系统主要集成了视频系统、环境监测、安全防范等数据, 进行展示和联动; 巡检机器人主要完成红外测温 and 表计读取, 一定程度上减轻了运维人员的工作量, 但受限于机器人的活动范围, 不能完全实现全覆盖; 极少数变电站部署了三维巡检系统, 通过对整站设备进行三维建模, 结合增强虚拟现实技术, 实现了变电站设备的虚拟化巡检^[3], 缺点在于和其他系统交互不足, 属于被动式运维系统, 尚不能实时全面地展示变电站设备运行情况。

设备巡检是变电站运维人员的一项重要工作, 传统以人工为主的现场变电设备检修模式, 不仅无法保证检修数据的准确性, 而且检修效率较低, 无法满足电力企业信息化及智能化检修要求^[4]。在运维人员的驻地运维班, 对变电站设备缺乏有效的监视手段^[5]。

2 需求分析

国家电网公司将“具有中国特色国际领先的能源互联网企业”确立为引领公司长远发展的战略目标。变电站在电力传输过程中是至关重要的环节, 电网规模越来越复杂, 变电站数量众多。变电站的安全运行需要运维人员投入大量的精力, 并且随着新技术的出现, 运维人员对运维智能化、可视化、远程化的需求也更加迫切。

2.1 远程化需求

传统运维模式基于人工、定期巡检, 变电站运维人员需要到站内对设备缺陷、故障信息进行巡视记录, 属于被动式的巡检模式, 且受恶劣天气影响较大, 缺少在运维班远程运维的手段^[6]。

2.2 智能化需求

智能变电站实施需要应用新的技术, 结合先进传感器技术、物联网技术、人工智能技术^[7], 实现变电站运维的自动化、智能化。

2.3 可视化需求

通过可见光摄像机拍摄实景, 通过三维建模虚拟现实, 虚实结合, 实时采集和图像识别的设备状态在虚拟场景中实时再现, 可视化的方式进行综合展示。

2.4 立体化需求

将激光导航轮式机器人、轨道机器人、固定点位摄像机相结合, 互为补充, 构建一个全方位、无死角的立体化巡检体系。

2.5 安全化需求

满足国家电网公司对信息安全的相关要求, 应采用安全操作系统, 双因子认证技术, 使用国密算法对通信数据和通信链路进行加密, 通过探针软件实时探测系统安全状态。

3 关键技术

3.1 图像采集技术

采集到高质量的图片是进行图像识别的基础, 图像采集受摄像机镜头、安装位置、环境光线、拍摄角度等多种因素影响。图像采集需通过多种技术来保证高质量图片的获取: 通过图像纠偏技术, 消除摄像机云台转动的机械误差, 确保多次拍摄角度一致; 通过图像模糊搜索技术, 消除摄像机镜头调焦时的机械误差, 确保照片清晰; 通过 HDR 技术, 解决采集图像过曝或欠曝问题, 确保图片照度适中。

3.2 图像识别技术

传统的图像识别技术包括: 图像获取、预处理、特征提取、分类等^[8]。基于深度学习的图像识别技术相比于传统方法, 能够提供基于学习的特征表示, 在自动特征提取和分割识别准确率方面具有良好表现^[9]。基于深度学习的图像识别技术是基于目标检测算法^[10], 具有高效的自动学习和分类能力, 在多领域的图像处理问题上取得了接近甚至超越人类水平的效果^[11]。

采用 Darknet 深度学习框架, 基于端到端的以速度闻名的 YOLO 算法^[12-13], 使用 darknet-53^[14]主干网络, 将目标检测问题重新构造成一个回归问题, 可以达到以下几个目标: (1) 检测速度快, 在 GTX1060 显卡上识别一张图片在 0.02 s 左右, 可以达到实时检测要求。(2) 位置准确率高, 即检测框与目标物的框交并比高。所以需通过输入不同尺度的图像训练, 通过边界框回归来解决宽高比不常见的物体检测。(3) 漏检率低, 召回率高, 必须尽量检测出所有的目标物体。即使在密集情况下, 位置靠近的物体识别准确率高, 小尺寸物体识别准确率高, 所以需输入高分辨率图片, 使用更多的网格来预测, mAP(平均精度)达到 97%。

YOLO 模型通过前馈运算包括卷积^[15]、池化、非线性激活等操作将图像中的高层语义逐渐由原始图像提取出来, 在最后一层根据不同的任务(分类、回归)表示为损失函数(预测识别结果与真实值之间

的误差函数)。训练过程是通过计算损失函数,再使用反向传播算法,逐层向前反馈更新每一层的神经元的参数,然后再进行前馈操作,再反馈更新参数,最终达到损失值收敛的结果。其卷积计算公式为

$$x'_j = \sigma(\sum_{i \in M_j} x'_i k_{ij}) \quad (1)$$

使用 Leaky ReLU 激活函数,它是一种改进的 ReLU 激活函数,ReLU 是将所有的负值都置为 0,而 Leaky ReLU 将所有的负值都乘以一个 0 到 1 的参数,既不使负值的作用完全消失,又弱化了负值对输出的影响。Leaky ReLU 激活函数为

$$y_i = \begin{cases} x_i, & \text{if } x_i \geq 0 \\ x_i a_i, & \text{if } x_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 表示输入; y 表示输出; $0 < a \leq 1$ 。

3.3 红外测温与诊断技术

红外监测与诊断技术是利用带电设备的致热效应,采用专用设备获取从设备表面发出的红外辐射信息,进而判断设备状况和缺陷性质的一门综合技术^[16]。红外热像仪利用红外探测器和光学成像物镜接受被测目标的红外辐射能量分布图形反映到红外探测器的光敏元件上,从而获得与温度场对应的红外热像图^[17],热像仪对全部运行设备进行扫描检查,发现存在异常的温度点,然后对温度异常的部位进行重点检测,测出异常点的温度^[18]。

为了判断设备是否故障,将异常点温度与正常运行时的温度进行比较,同时考虑周围环境条件的影响,最后根据设备的相对温差以及是否超出规定值,来确定设备故障与否。不但可以形成某一时刻的一些关键设备的设备温度曲线,也可以形成某一设备在一定历史时间内的时间-温度曲线。

3.4 智能巡检技术

通过预先设置的巡检策略,按特定逻辑并行或串行调用可见光摄像机、红外测温摄像机、导轨机器人、灯光控制器、轮式巡检机器人、噪声采集器、局放传感器等采集设备,对变电站一二次设备进行全方位立体式体检。智能巡检可分为例行巡检、特殊巡检、专项巡检、人工巡检等。

3.5 智能联动技术

通过单向隔离装置获取安全 I 区 SCADA 数据,智能联动服务检测到触发联动逻辑的信号时,自动进行推理分析,并启动相应的联动策略,比如,可对变电站中设备的操作进行自动识别捕捉,当开关位置发生变化时系统会自动推送视频画面,对整个开关位的变化过程进行全程监控,确保整个操作过程的安全性、准确性。

3.6 综合诊断技术

通过多种手段采集站内设备状态数据、图像、视频、声音等,对数据进行整合处理、抽象分类,筛选出最具代表性且能够灵敏反映站内关键设备工况的状态特征量,构建站内设备运行状态评价的基础数据库;通过建立各状态特征量间的潜在映射关系,构建设备运行状态趋势分析模型,定时进行运行趋势分析,辅以特定算法进行深度融合,从整体和趋势上分析设备健康状态,预判电力设备隐患、识别潜在故障^[19];结合专家知识库,提供主动巡检的具体措施及建议,实现早发现、早处理、快恢复,避免事故,减损增益。

3.7 可视展示技术

传统的监控展示方式真实感、临场感和表现力都不足,通过结合现场照片、红外图谱、三维模型^[20]、实时视频、音频回放,实现图文并茂、虚实结合、直观立体的可视化展现效果^[21-22],设备的状态、缺陷,通过自动生成的巡检报告可以多维度多视角一体展现,使得运维变得更直观、更方便、更高效。

4 系统架构及功能

4.1 系统架构

通过对上述变电站运维实际需求的分析,对涉及的关键技术进行研究,开发了一种变电站联合巡检系统。该系统可部署在变电站内,利用激光导航轮式机器人、轨道机器人、固定点位摄像机为核心构建立体巡检体系,实现智能巡检、智能操作、智能联动、智能安全的联合巡检系统。

如图 1 所示系统架构总体上由硬件层、平台层、应用层、展示层组成,通过设置独立的展示层,实现应用和展示的剥离,展示层不负责处理复杂的业务逻辑,方便快速实现 CS、BS、APP 不同模式的展示。



图 1 联合巡检系统架构图

Fig. 1 Architecture diagram of the joint inspection system

4.2 系统功能

变电站联合巡检系统主要包括联合巡检、全面感知、智能联动、诊断分析、综合展示等功能模块,如图2所示。通过各类先进传感器在线监测及联合巡检的手段对变电站设备状态、环境信息进行全面感知,有异常时智能联动,对收集到的多源数据进行综合诊断与分析,分析结果和报告进行综合展示。

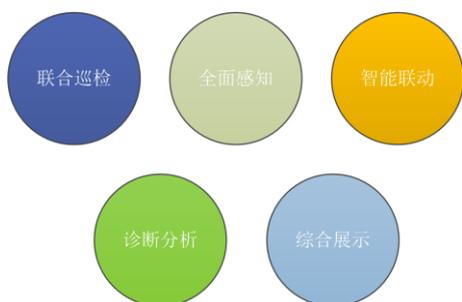


图2 联合巡检系统功能图

Fig. 2 Functional diagram of the joint inspection system

4.2.1 联合巡检

变电站联合巡检任务一般分4种类型:例行巡检、全面巡检、专项巡检、特殊巡检。无论哪种类型巡检的触发,都是由系统根据预置条件智能触发,无需人工干预。

1) 例行巡检。一般来说对变电站内设备的状态指示、表计、外观和变电站运行环境等方面进行除红外测温外的常规性巡检称之为例行巡检。

2) 专项巡检

专项巡检指针对某一特定类型专门开展的巡检任务。比如红外测温、油位油温表、避雷器表计、SF₆压力表、液压表、位置状态识别等。

3) 特殊巡检。特殊巡检是根据设备运行环境、方式变化而开展的一种巡检。

4) 全面巡检。全面巡检是指对站内设备表计、状态指示、接头温度、外观及辅助设施外观、变电站运行环境等进行全方位巡检。

巡检的触发条件分周期触发和条件触发两种。例行巡检、专项巡检、全面巡检多为周期触发,一般周期为日、周或者月。特殊巡检为条件触发。触发条件多种多样,可由遥测、遥信触发。比如大风后、雷雨、冰雪、冰雹、雾霾;设备发生过负荷或负荷剧增、超温、发热、系统冲击、跳闸等异常情况。联合巡检联动逻辑如图3所示。

4.2.2 全面感知

通过采用各类先进传感器、巡检机器人和在线监测设备,如红外摄像头、可见光摄像头、局放传感器、油色谱、断路器弹簧压力传感器、机械特性

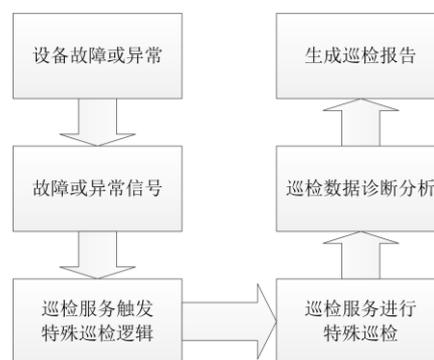


图3 联动逻辑图

Fig. 3 Logic diagram of linkage

传感器、温湿度传感器、声纹采集器等,对一二次设备的健康状态和环境信息进行联合巡检和全面感知,在线实时掌握设备异常情况,发现异常主动预警。全面感知获取的数据一般包括:遥信遥测数据、可见光照片、红外图谱、音频、视频等。

4.2.3 智能联动

除遥控联动、安防联动、火灾报警联动、有毒气体浓度越限联动外,系统可根据变电站出现的异常信号,自动触发相应的特殊巡检程序,由高清视频摄像机、红外成像设备对相关的一次设备、二次设备进行巡检,同时采集设备状态、环境信息、声音、在线监测等数据,进行综合分析,输出联合巡检报告。如某主变发生故障引发变压器主保护差流动作,触发特殊巡检的情况如图4所示。

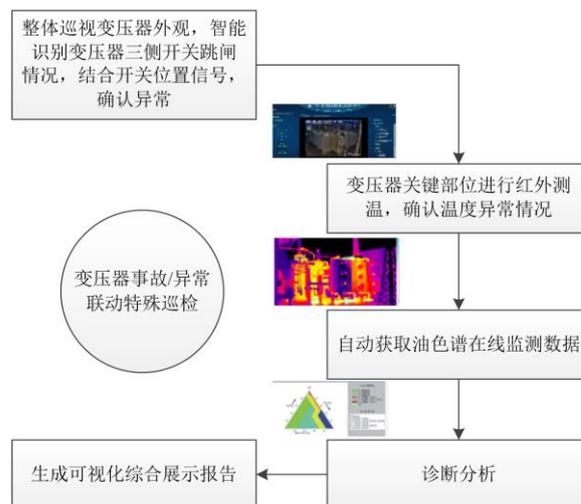


图4 联合巡检特殊巡检示意图

Fig. 4 Schematic diagram of joint/special inspection

4.2.4 诊断分析

联合巡检系统在巡检过程中,会通过各种传感器和采集设备收集到大量的不同来源不同性质的数

据, 包括经图像识别获取的 SF₆ 压力表、开关动作次数计数器、避雷器泄漏电流表、油温表、液压表、有载调压档位表、油位计等表计示数, 断路器、隔离开关等一次设备位置及切换把手、压板、指示灯、空开等二次设备的位置状态指示, 一次设备的破损、油污、异物等异常情况, 从设备本体、接头、套管、引线等重点部位的红外图谱获取的温度值, 声纹传感器采集的设备噪声、异响, 在线监测传感器和设备采集到的各种数据等。

联合巡检系统利用机器学习、人工智能算法对巡检采集到的这些多源数据进行分析、推理、训练、挖掘, 对设备的可能异常做出推断和预警, 并结合异常处理导则和专家系统知识库, 给出原因分析和处理建议。联合巡检提供的巡检结果可以为精益化评价、设备风险评估等相关工作提供支撑^[23]。

4.2.5 综合展示

利用地面激光雷达扫描变电站, 获取密集的三维点云数据^[24], 实现变电站一二次设备的 1:1 精细化三维建模, 通过虚拟现实的方式展现变电站实景三维场景, 设备状态变化在三维场景中动态实时再现^[25-26]。通过三维模型与视频采集设备的关联, 点击三维实景中的视频采集设备可实时调取视频监控画面, 支持视频设备的相关操作控制。

通过综合利用音频、视频、图片、三维信息, 实现图文并茂、直观可视的展现效果, 设备的状态、缺陷, 通过自动生成的巡检及故障分析报告可以多维度多视角一体展现。

5 应用情况

联合巡检系统已应用到国网智慧变电站 35 kV 杨围孜站、南网腰古站等项目。变电站内布置多个摄像头和轨道式机器人, 利用机器人和视频监控手段, 自主开展变电站设备周期巡视、红外检测, 远方开展设备特巡。采用图像识别技术, 实现数据自动抄录、状态自动判别和异常自动报警, 替代人工巡视, 提升巡检效率效益。在项目实施中对整个站的巡检策略进行优化提高巡检效率。

表 1 巡检点数量

Table 1 Number of points in the joint inspection

区域	巡检点数量	合计
控制室	50	50
35 kV 开关柜	20×18	360
直流开关柜	120	120
400 V 开关柜	300	300
总计	—	830

如表 1 中全站 830 个点为例, 通过以下几个巡检优化策略可以在 60 min 内完成全站巡检。根据经验值所估, 完成单点巡检一般需要 1 min。

优化策略 1: 单次识别反馈多结果。以图 5 为例, 开关柜上有 6 个开关分合指示灯和 6 个把手, 2 个控制模式状态, 可同时识别这 14 个结果, 效率提升 14 倍。这样一般适用于把手、指示灯、旋钮等对图片细节要求不高的情况。变电站所室内场景下指针类对象偏少, 把手、指示灯、旋钮较多, 优化空间较大。如果以 75% 的场景可以单次反馈多结果, 以每次返回 4 个结果为平均计数, 效率可以提升约 3 倍。



图 5 开关柜示意图

Fig. 5 Schematic diagram of switchgear

优化策略 2: 巡视任务分解。把全面巡检任务按地点或者屏柜进行分解。比如说把全面巡检任务按地点拆分为 4 个巡检任务: 控制室专项巡检、35 kV 开关柜专项巡检、直流开关柜、交流开关柜专项巡检, 效率可提升 4 倍。

优化策略 3: 单任务多摄像头同时巡检。以 35 kV 开关柜为例, 以 18 个开关柜为例, 一般会配置 6 个摄像头对其进行巡检。如果对 35 kV 开关柜进行专项巡检, 每个摄像头可以独立工作, 效率可提升 6 倍, 但该效率提升是随着开关柜数量增加而变大, 如果开关柜数量只有 3 个, 对应配置只有 1 个摄像头, 手段 3 无法发挥作用。所以该优化策略能提高效率约 3 倍。

优化策略 4: 点位优化。对于有些开关柜上门鼻锁、地线挂锁等不重要的点位, 可以不识别, 减少巡检点总数, 效率可显著提高。

全站 830 个点, 理想状态下需要的最小识别时间为 $830/3/3/4=23$ min。但实际上由于不同地点分布的点位是不均匀的, 识别类型也存在差异性, 实际情况下需要的巡检时间是大于该时间的, 但与此同时一般变电站需要巡检的点也是小于 830, 并可删减一些不需要的巡检点位。综上所述, 系统可以在 60 min 以内完成对全站的巡检。

6 总结

智慧变电站联合巡检系统整合全站多源数据, 通过采用多种先进传感器和采集设备, 实现设备状态全面感知, 通过图像识别、音频分析、人工智能技术实现联合巡检、智能联动、综合诊断, 实现故障隐患的主动发现、主动预警, 通过三维可视化技术结合实时音视频及设备状态信息, 实现虚实结合、立体可视的全景展示, 最终实现智慧变电站运维的巡视无人化、操作自动化、维护少人化。

参考文献

- [1] 秦红霞, 武芳瑛, 彭世宽, 等. 智能电网二次设备运维新技术研讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 35-40.
QIN Hongxia, WU Fangying, PENG Shikuan, et al. New technology research on secondary equipment operation maintenance for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 35-40.
- [2] 周正钦, 杜振波, 王文瑞, 等. 基于分层分布的变电站带电运维智能化技术及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 150-157.
ZHOU Zhengqin, DU Zhenbo, WANG Wenrui, et al. Intelligent technology and application of live detection for substation operation and maintenance based on hierarchical distribution[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 150-157.
- [3] 徐伟明, 朱晓峰, 王春新. 基于物联网与三维可视化技术的变电站智能辅助控制系统的研究与应用[J]. 电气自动化, 2012, 34(3): 67-70.
XU Weiming, ZHU Xiaofeng, WANG Chunxin. The research and application of intelligent assist control system based on the internet of thing[J]. Electrical Automation, 2012, 34(3): 67-70.
- [4] 彭志强, 周航, 韩禹. 智能变电站自动化设备透明运维系统构建与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 156-163.
PENG Zhiqiang, ZHOU Hang, HAN Yu. Construction and application of transparent operation and maintenance system for smart substation automation equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 48(13): 156-163.
- [5] 陈国华, 陈纬楠. 变电站自动化设备远程集中运维系统技术方案研究[J]. 电工技术, 2017(9): 121-122.
CHEN Guohua, CHEN Weinan. Research on remote centralized operation and maintenance system technical scheme of substation automation equipment[J]. Electric Engineering, 2017(9): 121-122.
- [6] 张巧霞, 王广民, 李江林, 等. 变电站远程运维平台设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 165-173.
ZHANG Qiaoxia, WANG Guangmin, LI Jianglin, et al. Design and implementation of substation remote operation and maintenance platform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 165-173.
- [7] 徐融, 赖菲, 陈亚鹏, 等. 深度学习算法在光伏电站无人机智能运维中应用[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 139-144.
XU Rong, LAI Fei, CHEN Yapeng, et al. Application of deep learning algorithm in intelligent operation and maintenance of UAVs in photovoltaic power plants[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 139-144.
- [8] 徐融, 邱晓晖. 一种改进的 YOLO V3 目标检测方法[J]. 计算机技术与发展, 2020, 30(7): 30-33.
XU Rong, QIU Xiaohui. An improved YOLO V3 object detection[J]. Computer Technology and Development, 2020, 30(7): 30-33.
- [9] 郑远攀, 李广阳, 李晔. 深度学习在图像识别中的应用研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(12): 20-36.
ZHENG Yuanpan, LI Guangyang, LI Ye. Survey of the application of deep learning in image recognition[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(12): 20-36.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[C] // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 27-30, 2016, Las Vegas, NV, USA: 779-788.

[13] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: better, faster, stronger[C] // 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA.

[14] REDMON J, FARHADI A. Yolov3: an incremental improvement[J/OL]. (2018-04-08)[2019-07-02]. <https://arxiv.org/abs/1804.02767>.

[15] 曹燕, 李欢, 王天宝. 基于深度学习的目标检测算法研究综述[J]. 计算机与现代化, 2020(5): 63-69.
CAO Yan, LI Huan, WANG Tianbao. A survey of research on target detection algorithms based on deep learning[J]. Computer and Modernization, 2020(5): 63-69.

[16] 方文崇, 梁寿愚. 基于三维可视化的变电站智能辅助系统应用研究[J]. 信息技术, 2017(4): 54-56, 60.
FANG Wenchong, LIANG Shouyu. Study and application of intelligent assisted system in substation based on 3D visualization[J]. Information Technology, 2017(4): 54-56, 60.

[17] 戴景民, 汪子君. 红外热成像无损检测技术及其应用现状[J]. 自动化技术与应用, 2007(1): 1-7.
DAI Jingmin, WANG Zijun. Infrared thermography non-destructive testing technology and its applications[J]. Techniques of Automation & Applications, 2007(1): 1-7.

[18] 刘元林, 梅晨, 唐庆菊, 等. 红外热成像检测技术研究现状及发展趋势[J]. 机械设计与制造, 2015(6): 260-262, 266.
LIU Yuanlin, MEI Chen, TANG Qingju, et al. Research status and development trend of infrared thermal imaging detection technology[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(6): 260-262, 266.

[19] 秦刚华, 雷丽君, 郭鼎, 等. 燃煤电站高压加热器系统故障仿真与诊断[J]. 热力发电, 2019, 48(6): 108-114.
QIN Ganghua, LEI Lijun, GUO Ding, et al. Fault simulation and diagnosis for high pressure heater of coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(6): 108-114.

[20] 周东阳, 刘爱君, 王承文, 等. 电站三维数字化模型技术的研究与应用[J]. 热力发电, 2020, 49(1): 134-138.
ZHOU Dongyang, LIU Aijun, WANG Chengwen, et al. Research and application of 3D digital model technology in power plan[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(1): 134-138.

[21] 冯辅周, 张超省, 江鹏程. 超声红外热像技术中缺陷的自动识别[J]. 激光与红外, 2012, 42(10): 1149-1153.
FENG Fuzhou, ZHANG Chaosheng, JIANG Pengcheng. Automatic identification of crack in ultrasonic infrared imaging technology[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(10): 1149-1153.

[22] 张文建, 梁庚, 李庚达, 等. 智慧化全数字技术及其在电厂中的应用[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 202-211.
ZHANG Wenjian, LIANG Geng, LI Gengda, et al. Intelligent full-digital technology and its applications in power plant[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 202-211.

[23] 李新星, 何亮, 林选. 红外诊断技术在电力系统中的应用[J]. 电气技术, 2014(9): 78-82.
LI Xinxing, HE Liang, LIN Xuan. The specific application of infrared diagnosing technology in electric power system[J]. Electrical Engineering, 2014(9): 78-82.

[24] 邵全, 纪陈云, 李军. 三维全景及全景动态融合技术在智能变电站管理中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2018(4): 168-172.
SHAO Quan, JI Chenyun, LI Jun. Application of three-dimensional panoramic and panoramic dynamic fusion technology in intelligent substation management[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2018(4): 168-172.

[25] 李玲侠. 基于三维点云的变电站设备分类识别研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
LI Lingxia. Electrical equipment classification based on 3D point cloud[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.

[26] 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): 111-116.
HE Zhipeng, ZHENG Yongkang, LI Xunbo, et al. Visualization research on secondary equipment simulation training system for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 111-116.

收稿日期: 2020-08-26; 修回日期: 2020-10-02
作者简介:

张春晓(1976—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化及智能运维; E-mail: chunxiao.zhang@sieyuan.com

陆志浩(1969—), 男, 高级工程师, 从事输变电设备运行管理工作; E-mail: luzhihao@sh.sgcc.com.cn

刘相财(1986—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统自动化。E-mail: lxc.200985@sieyuan.com

(编辑 张爱琴)