

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200606

基于边云协同的变电设备多状态量监测系统研究

江翼^{1,2}, 刘正阳^{1,2}, 王文瑞³, 周文^{1,2}, 徐惠^{1,2}

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 210061; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞
有限责任公司, 湖北 武汉 430074; 3. 中国科学院上海高等研究院, 上海 200120)

摘要: 为了解决变电设备的多状态量监测中面临的异构传感器接入困难、数据处理时延大、数据传输带宽占用率高等问题, 提出了基于边云协同的变电设备多种状态量监测系统。设计了变电设备状态监测的边云协同服务架构。研制了边缘计算装置, 支持多种传感器协议的解析、数据采集和边缘计算。实现了变电设备在边缘侧的状态评价和边缘服务, 并进行了现场应用验证。该系统为变电设备的状态监测提供了新的思路, 具有很高的应用价值。

关键词: 变电站; 变电设备; 边缘计算; 云计算; 状态监测; 状态评价

Research on multi-state monitoring system of substation equipment based on edge-cloud collaboration

JIANG Yi^{1,2}, LIU Zhengyang^{1,2}, WANG Wenrui³, ZHOU Wen^{1,2}, XU Hui^{1,2}

(1. NARI Group Corporation, State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210061, China;
2. Wuhan NARI Co., Ltd., State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;
3. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200120, China)

Abstract: There are problems of difficulty in accessing a large number of heterogeneous sensors and in the time-delay of data processing and analysis and high data transmission bandwidth occupancy rate in the multi-state monitoring of substation equipment. This paper proposes a monitoring system for multiple state quantities of substation equipment based on edge-cloud collaboration. An edge cloud collaborative service architecture for the monitoring of substation equipment is designed. An edge computing device is developed. It supports multiple sensor protocol analysis, data collection and edge computing. It realizes the status evaluation and edge service of the substation equipment on the edge side, and carries out on-site application verification. The system provides new ideas for the condition monitoring of substation equipment and has high application value.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Development of Intelligent Component for Multi-state Variables Configurable Power Transformation Device and Research on Field Calibration Technique for Key Parameters" and Shanghai Municipal Natural Science Foundation (No. 19ZR1463800).

Key words: substation; substation equipment; edge computing; cloud computing; state monitoring; state evaluation

0 引言

泛在电力物联网的核心是利用智能感知技术、现代信息技术、人工智能技术、先进通信技术等关键技术, 在电力系统的各个环节进行应用, 实现电力系统中设备、工作流程、工作人员的移动互联网和人机交互等功能, 应对复杂电力网络的运行控制、海

量信息监测、应用服务等带来的问题和挑战^[1-4]。

边缘计算作为泛在电力物联网中现代信息技术的关键技术之一, 通过边缘检测、信息融合、网络融合、分布式存储、分布式计算等技术为电力系统的边缘侧提供智能化的数据服务, 能够有效提高电力系统的管理水平和运行效率。变电站作为智能电网重要组成部分, 变电设备的安全稳定运行直接关系到电力的供应和服务的质量。目前, 物联网技术已经在变电站设备监测方面进行了广泛应用, 大量物联网终端接入主站系统, 通过云计算技术实现变电设备的状态评估。基于云边协同的变电设备状态

基金项目: 国家电网公司科技项目资助“多状态量可组态变电设备智能组件开发及关键参量现场校验技术研究”; 上海市自然科学基金项目资助(19ZR1463800)

监测与评估逐渐成为研究的热点。

近年来国内外专家学者在变电设备状态监测与评估方面的研究主要集中在各个变电设备的分层评估、多源信息融合评价及定量定性指标评估等方面。文献[5-12]针对变压器、继电保护、开关柜、架空输电线路等设备利用云计算、人工智能、大数据等技术在云端建立变电设备的状态评估模型并对模型进行了验证。这些研究以云平台为中心为变电设备的状态评估和故障诊断提供云应用及服务。

由于变电设备空间分布广、总量大,传统的中心化主站及云计算面临着云应用爆炸式增长的问题,难以满足变电站多业务、低时延、快速响应的需求。本项目在对变电设备的多状态量监测的基础上,分析了现有中心化主站模式的设备监测中存在的问题与挑战,基于边云协同计算技术构建了适用于变电站多状态量监测的边云协同服务框架,并设计了变电设备多状态量监测的边缘计算装置,

最后结合变电站的实际应用案例分析了边云协同的变电设备状态监测的重要作用和技术优势。

1 系统设计

传统的变电设备状态监测系统中,边端采集的变电设备运行状态数据都会发送到主站系统,利用云计算技术实现变电设备的状态评估、故障诊断等应用^[13-17]。本文提出基于边云协同的变电设备多状态量监测系统架构方案,在边缘侧获取变电设备的状态监测数据并进行就地的数据处理和分析,实现对边缘感知数据的预处理和信息融合,同时与云平台服务协同实现面向运维人员和用户的更高级的应用,实现变电设备的运维指导、故障诊断与预测、状态预警、管理优化等应用目标,达到提高运维检修效率、降低变电设备故障风险、提升管理质量和服务等应用效果。基于边云协同的变电设备多状态量监测系统架构如图1所示。

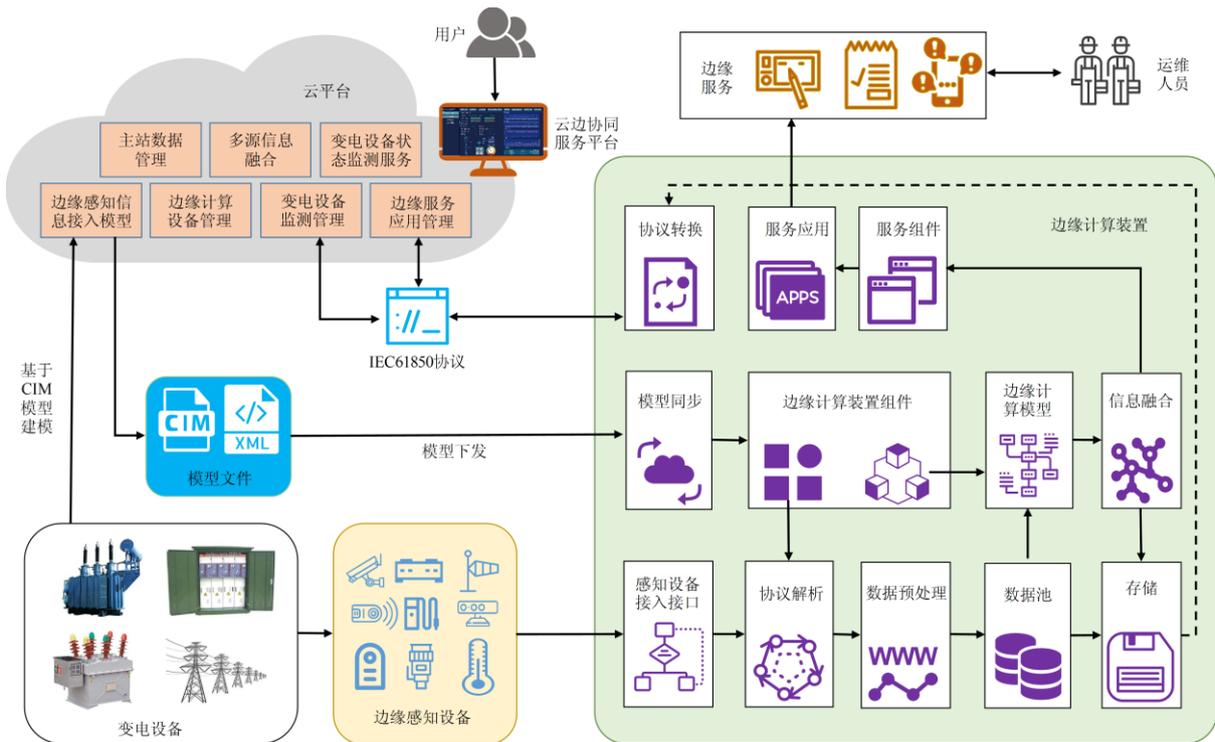


图1 边云协同系统框架

Fig. 1 Architecture of edge-cloud collaborative system

边缘侧感知的变电设备数据接入边缘计算装置,边缘计算装置同步云平台上发的监测模型、边缘计算模型、边缘服务模型,并在边缘计算装置进行部署,边缘监测模型对接入的数据进行协议解析、数据预处理,建立边缘检测数据池,边缘计算模型对数据池中的数据进行信息融合和数据分析,实现

在边侧的推理决策、状态评估等,边缘服务组件将信息融合和数据分析的结果传送到边缘服务应用,为变电设备提供智能化的边缘服务。边缘计算装置将处理后的数据和信息融合的结果经过协议转换发送到云平台。云平台通过变电设备信息接入模型管理、边缘计算装置管理、变电设备管理、边缘服务

管理等组态模块管控边缘计算装置及其上传的数据信息, 提供面向变电设备监测的云服务应用。该系统架构支持边缘计算装置、边缘感知设备的灵活部署, 边缘侧模型的自动更新, 实现云导向的边云协同建模和边侧应用的全生命周期管理(创建、卸载、配置、更新、监控), 提供从边缘侧的数据采集到云服务应用的一体化服务, 建立面向变电设备运行监测及运维的云边协同服务, 在边缘侧对电力设备进行风险预测、状态评估, 能够有效兼顾运维检修的可行性、及时性和经济性原则, 实现变电设备的运维检修辅助决策, 制定柔性、客观、准确的运维检修策略, 从而提高变电设备的可靠运行, 进一步保障电力系统的安全稳定运行。利用边缘计算装置对变电设备的运行状态监测数据进行处理分析, 通过云边协同处理, 提高数据处理的效率, 从而减轻云计算的压力, 增加云计算平台的终端接入数量, 提高带宽利用率, 降低数据时延, 节约云平台的资源与成本。

2 边缘计算装置设计

近年来一些企业、科研院所和高校设计实现了多种具有扩展功能的数据网关, 主要在网关的连接属性上增加了感知设备的数据接入、采集和传输功能^[18-20]。在变电设备多状态量监测应用中, 边缘计算装置除了具备协议转换、数据采集、设备管理等数据网关的功能外, 还能实现边缘计算与边缘服务, 主要包括边端的数据预处理、信息融合与决策、数据存储、边云协同服务、边缘服务应用等。本文研制的边缘计算装置采用模块化设计思路进行硬件设计和软件开发, 其软硬件系统架构如图 2 所示。

边缘计算装置的软件系统主要包括系统运行环境、算法平台、设备交互、数据预处理、数据服务、边缘计算、边缘服务应用、网络服务、协议转换、模型同步和信息安全服务。边缘计算装置在 Linux 系统环境下能够运行 TensorFlow、Caffe 等人工智能算法平台, 支持 Python、C++ 等语言, 开发了边缘感知的数据采集接口、协议解析接口实现边缘计算装置与边缘感知设备的交互, 开发了数据预处理模块实现对采集的传感数据进行清洗和过滤。构建适用于变电设备状态监测的数据池, 包括设备数据、传感数据、计算数据等数据的分类和存储。进一步开发了适用于变电设备状态监测的边缘计算服务、边缘服务应用、网络服务, 为边缘计算装置提供事件管理、网络管理、算法模型管理等应用工具。通过模型同步服务实现云端模型的同步, 通过协议转换服务将数据转换成 IEC61850 协议并发送到云平台。

为了保障边缘计算装置的数据安全, 开发了信息安全服务, 实现数据的加密、电力专网的接入等功能。各个模块之间通过 API 接口进行数据的共享和交互, 实现系统的快速部署和移植, 提高系统运行的稳定性。

边缘计算装置的硬件模块主要包括主控单元、存储单元、通信单元、外设接口、数据采集接口、报警单元。主控单元采用 TI 公司的 AM3359 芯片, 并配有 2 GB 的内存, 8 GB 的存储。存储模块采用 128 GB 的固态硬盘用于数据的存储。通信单元支持 2/4G、WiFi、Lora、ZigBee、以太网通信, 其中 2/4G、WiFi、以太网可用于与平台的数据交互, WiFi、Lora、ZigBee 用于接入变电设备的无线传感器网络。外设接口主要实现与传感器的有线连接, 包括 RS232、RS485、CAN 总线、USB 等。数据采集接口主要用于模拟量传感器的接入。报警单位主要实现边缘服务的本地预警, 包括声光报警、语音报警等。

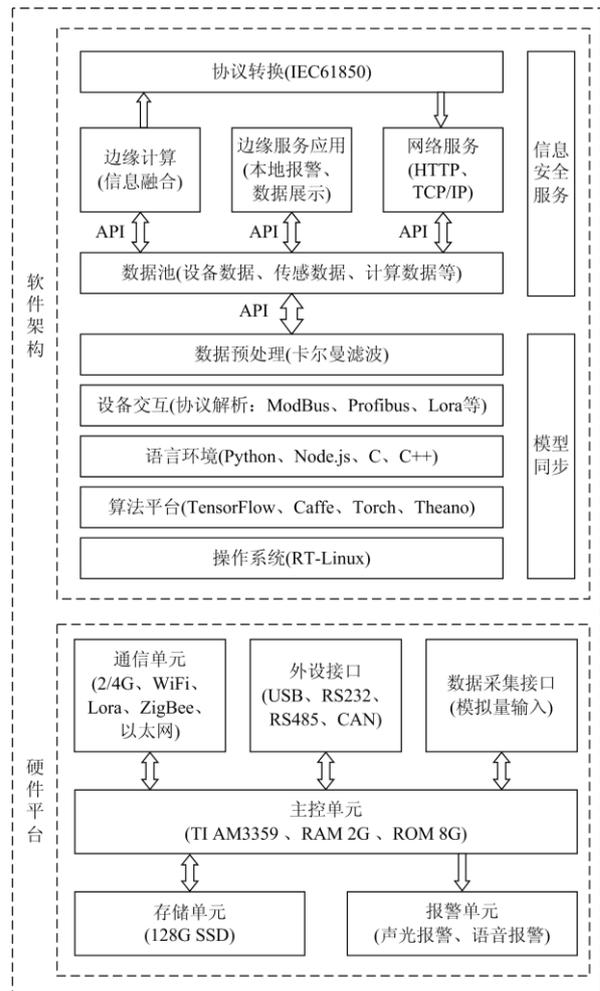


图 2 边缘计算装置软硬件架构
Fig. 2 Architecture of edge computing device software and hardware

3 基于随机森林算法的变电设备状态评价

边缘计算装置的核心技术是实现边缘计算, 对变电设备的状态数据在边缘侧进行信息融合, 实现变电设备的就地状态评价, 本文采用随机森林算法实现变电设备的状态评价。随机森林(Random Decision Forests)算法是一种机器学习算法, 主要由多个决策树(decision tree)组成, 为避免单个决策树产生过拟合, 其输出结果通过多个决策树投票的方式选取最优。随机森林算法对于解决回归问题、分类问题和特征选择问题具有很好的应用效果^[21-23]。在进行变电站设备状态评价过程中, 各个变电设备状态特征明显, 其对应的设备缺陷清晰, 能够很好地对引起变电设备状态异常的原因进行追溯, 因此, 选择随机森林算法用于变电设备状态评价和影响变电设备运行状态的原因追溯上具有可行性。

决策树通过数据的特征进行分类, 因此, 数据的特征选取的参数影响所生成的决策树的好坏。结合熵的概念将事物的分类进行定义, 对于所划分的多个类别中, 其中某个类别的熵的定义为

$$Entr(S) = \sum_{i=1}^c [P_i \log(\frac{1}{P_i})] \quad (1)$$

式中, P_i 为全部训练集 S 中第 i 个类所占的比例。

式(1)中的熵 $Entr(S)$ 用于衡量随机变量的特征的不确定性。其中熵与不确定性的对应关系为: 熵越小不确定性越低, 熵越大不确定性越高。因此, 用熵来判别样本的纯度。用 Q 作为数据集中的决策属性, 其信息增益为

$$Gain(S, Q) = Entr(S) - \sum_{V \in V(Q)} \frac{|S_V|}{|S|} Entr(S_V) \quad (2)$$

式中: $V(Q)$ 为 Q 的值域; $|S_V|$ 为决策属性为 Q 的数据的数量; $|S|$ 为全部数据集的数量。

生成决策树后, 对全部特征的信息增益进行计算, 在生成决策树枝时, 以具有最大信息增益的数据特征开始分类, 直到全部决策树结点的分类熵为 0 时停止。由于会出现过拟合的情况, 生成决策树之后需要对决策树进行剪枝处理。设定一个阈值, 当在分类的过程中出现某一分类的数据量比所设定阈值小的情况时, 将该集合作为一个叶节点, 并返回目标特征的众数, 以此作为该分类的结果。随机森林算法采用 Bootstrap 方法对训练集的数据进行分类, 通过不同的数据集训练能够产生多个决策树。

基于随机森林算法的变电设备状态评价过程可描述为: 边缘计算装置对采集的变电设备的状态数据进行预处理, 并将处理后的数据缓存在数据池,

基于随机森林模型建立影响变电设备运行状态的各个状态评价等级的映射关系, 然后输入测试数据集进行计算, 产生变电设备综合状态评价结果, 具体步骤如下:

步骤 1: 边缘计算装置获取变电设备状态监测的传感器数据, 并对数据进行预处理, 形成变电设备状态数据集, 重复 N 次(N 为决策树的数量);

步骤 2: 将数据集分为训练集和测试集;

步骤 3: 对测试集和训练集进行特征提取;

步骤 4: 设置 N 个决策树分类器模型;

步骤 5: 选用不同的数据集对决策树模型进行训练;

步骤 6: 使用训练的决策树模型对测试集进行测试;

步骤 7: 输出分类结果, 形成变电设备综合状态评价结果。

基于随机森林的变电设备状态评价实现流程如图 3 所示。

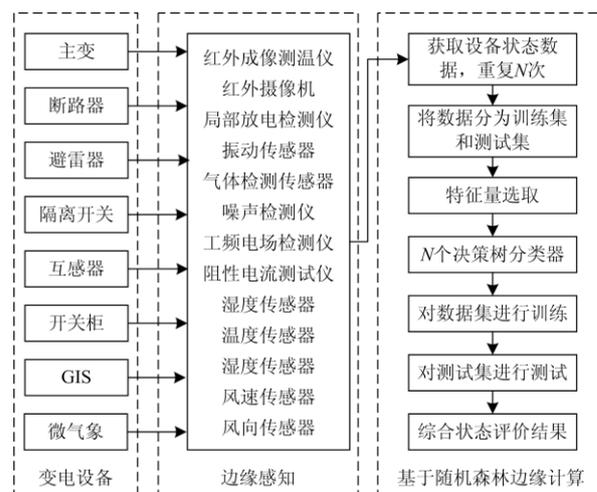


图 3 基于随机森林的变电设备状态评价流程

Fig. 3 Evaluation process of substation equipment condition based on random forest algorithm

4 边云协同的变电设备多状态量监测

边缘计算是在物联网的感知层进行就地计算的一种分布式计算, 能够有效解决感知侧数据处理的实时性、可靠性和安全性的问题, 与云计算协同能够更好地在物联网各个场景进行应用^[24-25]。边云协同的变电设备状态监测是泛在电力物联网的“云-管-边-端”架构的典型应用。将云计算与边缘计算技术融合到变电设备的多状态量监测, 由边缘计算装置就地进行数据的处理、融合、分析和边缘服务。在云平台上实现边缘模型的管理、边缘计算装置的管理、变电设备的管理、边缘应用的管理和面向用

户的更高级云服务。在边缘计算装置中实现与感知设备的交互、数据的采集和处理、网络服务、协议转换和边缘服务，边缘计算装置的服务应用由云平台统一管理，从而实现变电设备状态监测的协同服务。

4.1 边云协同的变电设备状态监测的关键技术

边云协同的变电设备状态监测需要实现边缘感知设备的自适应接入、数据的处理分析、模型同步、协议转换、边缘服务等功能，需要突破以下关键技术：

1) 多种传感器接口及协议的自适应适配，包括多种总线协议、硬件接口协议、网络通信协议和无线通信协议等。边缘计算装置的数据采集服务支持各种传感器协议，能够采集变电设备状态监测的异构传感器数据。

2) 边缘计算装置的模型同步，云平台实现边缘计算装置及相关应用服务的全生命周期管理(模型创建、配置、更新、卸载、监控)，通过云平台建立边缘计算装置的监测模型、计算模型和边缘服务，并将配置信息、模型文件和应用服务下发到边缘计算装置进行配置和执行。

3) 边缘侧的数据融合，通过在云平台将各个变电设备的信息融合模型进行训练，边缘计算装置同步计算模型实现变电设备的边缘侧状态感知。

4) 边缘计算装置具有可移植性、可扩展性、模块化、自组网的特点，在边缘计算装置上运行各种变电设备的边缘服务应用。通过模块化设计将边缘计算装置的软件框架分为数据服务、应用服务、配置服务三大块，其中数据服务实现数据的采集、边缘计算、数据上传等功能，应用服务实现边缘服务应用和信息安全应用等功能，配置服务实现边缘计算装置的模型同步和模型的配置。

5) 信息安全方面，通过身份认证、数据加密、应用安全、防火墙等多项机制保障边缘计算装置的数据安全。

4.2 边云协同的变电设备状态监测的创新

基于边云协同的变电设备多状态量监测系统，在某变电站实现了站内变电设备的边云协同监测及边缘服务，其创新主要体现在以下几点：

1) 在变电设备状态监测方面，能够接入现有变电设备状态监测的传感器及传感网，同时能够接入新型传感器实现变电设备状态监测数据的就地处理和分析。

2) 解决了传统中心化主站状态监测模式面临的云应用爆炸的问题，提高现有的电力系统主站终端设备的接入量，节省数据传输的带宽资源，降低数据传输的时延。

3) 结合变电设备运维工作流程和运维策略，在

边缘侧进行变电设备的状态监测过程中实现变电设备智能化运维操作，提高运维人员的工作效率。

4) 边云协同为每台变电设备提供具有针对性的边缘服务和云服务应用，满足电网的多业务需求。

基于边云协同的变电设备多状态量监测系统解决了终端侧的数据孤岛、集成化程度低、协议繁杂、运维工作量大等问题，有效提高了变电设备状态感知的广度和深度，与变电设备运维相结合能有效提升运维的效率和智能化水平。

5 系统应用验证

参考文献[26-28]中列出了部分变电设备状态监测所需的传感器，本文按照表 1 种所列的典型变电设备的监测量进行传感器的选取，每个变电设备所需的监测传感器接入对应的边缘计算装置，边缘计算装置利用随机森林算法对该变电设备进行状态评价，并将评价的结果发送到云平台和边缘服务应用。

表 1 变电站多状态量监测场景

Table 1 Multi-state quantity monitoring scene in substation

分类	监测对象	传感器配置
设备	主变	红外摄像机、局部放电检测仪、振动传感器、气体检测传感器、噪声检测仪、红外成像测温仪
	断路器	红外摄像机、噪声检测仪、工频电场检测仪、局部放电检测仪、振动传感器
	避雷器	阻性电流测试仪、红外摄像机
	隔离开关	红外成像测温仪、工频电场检测仪、局部放电检测仪、红外摄像机
	互感器	红外成像测温仪、工频电场检测仪、红外摄像机
	开关柜	工频电场检测仪、局部放电检测仪、红外成像测温仪、湿度传感器
	GIS	红外摄像机、局部放电检测仪、工频电场检测仪、噪声检测仪
环境	微气象	温度传感器、湿度传感器、风速传感器、风向传感器

云平台建立各个变电设备的状态监测模型、边缘计算模型和边缘服务应用，并同步到边缘计算装置，边缘计算装置经过数据采集、处理和信息融合后将变电设备状态评价的结果进行展示，部分展示界面如图 4 所示。

通过在现场进行应用验证，表明设计的边云协同的变电设备多状态量监测系统能够有效地实现变电设备状态监测数据的就地处理和边缘服务。云平台对边缘计算上传的数据、主站数据和其他监测数据做进一步的计算分析，为电网的不同业务需求提供多元化的应用服务。



图4 数据展示

Fig. 4 Example of data display

6 结语

研究了基于边云协同的变电设备多状态量监测技术,并设计了变电设备边云协同服务的系统架构,研制了边缘计算装置,能够实现不同监测传感器的协议解析、数据预处理,通过边缘计算实现变电设备在边缘侧的状态评价,为变电设备提供智能化的边缘服务。通过现场应用验证,表明设计的基于边云协同的变电设备多状态量监测系统能够提高变电设备监测与管控的网络化、智能化和自动化水平,具有良好的应用和推广价值。针对变电设备的状态评价本文采用了随机森林算法,在下一步的研究中将针对不同的变电设备训练更多的算法模型,以提高边缘计算装置的应用范围。

参考文献

- [1] 白昱阳, 黄彦浩, 陈思远, 等. 云边智能:电力系统运行控制的边缘计算方法及其应用现状与展望[J]. 自动化学报, 2020, 46(3): 397-410.
BAI Yuyang, HUANG Yanhao, CHEN Siyuan, et al. Cloud-edge intelligence: status quo and future prospective of edge computing approaches and applications in power system operation and control[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(3): 397-410.
- [2] MAO Y Y, YOU C S, ZHANG J, et al. A survey on mobile edge computing: the communication perspective[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2322-2358.
- [3] WANG Y, TAO X F, ZHANG X F, et al. Cooperative task offloading in three-tier mobile computing networks: an ADMM framework[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3): 2763-2776.

- [4] 邹萍, 张华, 马凯蒂, 等. 面向边缘计算的制造资源感知接入与智能网关技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 40-48.
ZOU Ping, ZHANG Hua, MA Kaidi, et al. Perception and access of manufacturing resources and intelligent gateway technology for edge computing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(1): 40-48.
- [5] 齐振忠. 多信息融合的变压器实时状态评估[J]. 高压电器, 2012, 48(1): 95-100.
QI Zhenzhong. Real-time status evaluation of transformer with multi-information fusion technology[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1): 95-100.
- [6] 陈发广, 周步祥, 曾澜钰. 基于多信息融合的变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4): 140-144.
CHEN Faguang, ZHOU Buxiang, ZENG Lanyu. State evaluation model of transformer operation based on multi-information fusion[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2013, 25(4): 140-144.
- [7] ZHANG L, CHEN H, WANG Q, et al. A novel on-line substation instrument transformer health monitoring system using synchrophasor data[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1451-1459.
- [8] 陈俊星. 基于数据挖掘技术的电力设备状态评估[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
CHEN Junxing. Condition assessment of electric power equipment based on data mining technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [9] 夏拥, 王奇, 张晗, 等. 基于大数据的输变电设备缺陷评估示范平台设计[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(12): 15-19.
XIA Yong, WANG Qi, ZHANG Han, et al. Design of a demonstration platform for defect assessment of power transmission and distribution equipment based on big data[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(12): 15-19.
- [10] 孙鹏, 耿苏杰, 王秀丽. 基于时效评分函数和贝叶斯概率的电力变压器状态实时评估[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1069-1077.
SUN Peng, GENG Sujie, WANG Xiuli. Real-time condition assessment of power transformers based on time-effect score function and Bayesian probability[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1069-1077.
- [11] ZHAO X, YAO C, ZHOU Z, et al. Experimental evaluation of transformer internal fault detection based on V-I characteristics[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(5): 4108-4119.
- [12] 杨国生, 戴飞扬, 王文焕, 等. 基于灰度关联法和TOPSIS法的继电保护状态评估综合算法研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(2): 94-103.
YANG Guosheng, DAI Feiyang, WANG Wenhuan, et al. Research and application of comprehensive algorithm of relay protection status assessment based on gray

- correlation analysis and TOPSIS method[J]. *Electric Power*, 2019, 52(2): 94-103.
- [13] 刘琨, 黄明辉, 李一泉, 等. 智能变电站继电保护在线巡检方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(7): 58-65.
LIU Kun, HUANG Minghui, LI Yiquan, et al. Research on online operation method for protective relay of smart substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(7): 58-65.
- [14] 吴迪, 汤小兵, 李鹏, 等. 基于深度神经网络的变电站继电保护装置状态监测技术[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(5): 81-85.
WU Di, TANG Xiaobing, LI Peng, et al. State monitoring technology of substation relay protection device based on deep neural network[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(5): 81-85.
- [15] 辛建波, 康琛, 翁新林, 等. 基于聚类和时间序列分析的变压器状态评价方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(3): 64-70.
XIN Jianbo, KANG Chen, WENG Xinlin, et al. Evaluation method of transformer state based on clustering and time series analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(3): 64-70.
- [16] CHEN Haoyong, WANG Xiaojuan, LI Zhihao, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of ubiquitous power internet of things[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(2): 151-158. DOI: 10.1186/s41601-019-0128-2.
- [17] ZHAO L, MATSUO I B M, SALEHI F, et al. Development of a real-time web-based power monitoring system for the substation of petrochemical facilities[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(1): 43-50.
- [18] KHAN R, KHAN S U. Design and implementation of UPnP-based energy gateway for demand side management in smart grid[J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2017, 8: 8-21.
- [19] 旻雪城, 范平清. 基于边缘计算的物联网网关监控系统的研究[J]. *电子器件*, 2019, 42(6): 1569-1573, 1577.
SHU Xuecheng, FAN Pingqing. Research on gateway monitoring system of internet of things based on edge computing[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2019, 42(6): 1569-1573, 1577.
- [20] 陈思, 吴秋新, 龚钢军, 等. 基于边云智能协同的配电网信息物理系统[J]. *北京信息科技大学学报: 自然科学版*, 2020, 35(1): 95-100.
CHEN Si, WU Qiuxin, GONG Gangjun, et al. Distribution network information physics system based on edge cloud intelligent collaboration[J]. *Journal of Beijing Information Science & Technology University: Natural Science Edition*, 2020, 35(1): 95-100.
- [21] 孟亦凡, 李敬兆, 张梅. 基于 LSTM 边缘计算与随机森林雾决策的矿工状态监测设备[J]. *煤矿机械*, 2018, 39(11): 144-148.
MENG Yifan, LI Jingzhao, ZHANG Mei. Miner condition monitoring equipment based on LSTM edge calculation and random forest decision[J]. *Coal Mine Machinery*, 2018, 39(11): 144-148.
- [22] 杨瑞君, 赵楠, 凡耀峰, 等. 基于随机森林模型的城市空气质量评价[J]. *计算机工程与设计*, 2017, 38(11): 3151-3156.
YANG Ruijun, ZHAO Nan, FAN Yaofeng, et al. Evaluation of urban air quality based on random forests model[J]. *Computer Engineering and Design*, 2017, 38(11): 3151-3156.
- [23] BIENVENIDO-HUERTAS D, RUBIO-BELLIDO C. Automation and optimization of in-situ assessment of wall thermal transmittance using a random forest algorithm[J]. *Building and Environment*, 2020, 168: 1-15.
- [24] RUAN L, YAN Y, GUO S, et al. Priority-based residential energy management with collaborative edge and cloud computing[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 16(3): 1848-1857.
- [25] TANG J, ZHOU Z, XUE X, et al. Using collaborative edge-cloud cache for search in internet of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(2): 922-936.
- [26] 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.
- [27] 严英杰, 盛戈峰, 陈玉峰, 等. 基于大数据分析的输变电设备状态数据异常检测方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(1): 52-59.
YAN Yingjie, SHENG Gehao, CHEN Yufeng, et al. An method for anomaly detection of state information of power equipment based on big data analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(1): 52-59.
- [28] 王硕. 基于大数据分析技术的输变电设备状态评估系统的设计与实现[D]. 济南: 山东大学, 2018.
WANG Shuo. The design and implementation of transmission and distribution equipment condition evaluation system based on big data analysis technology[D]. Jinan: Shandong University, 2018.

收稿日期: 2020-05-31; 修回日期: 2020-06-23

作者简介:

江翼(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向高压电器设备绝缘检测与评估诊断技术;

王文瑞(1988—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为智能检测与控制技术、物联网技术等。E-mail: wangwr@sari.ac.cn

(编辑 葛艳娜)