

全景热成像感知系统在输变电设备巡检检测中的应用

童雪燕¹, 刘海², 宋延良², 邵久柠², 杨新州³

(1. 安徽合凯电气科技股份有限公司, 安徽 合肥 231131;
2. 华电新疆发电有限公司新能源分公司, 新疆 乌鲁木齐 832000;
3. 上海昆拓电气科技有限公司, 上海 201612)

Application of Panoramic Thermal Imaging Sensing System in Inspection and Detection of Power Transmission and Transformation Equipment

TONG Xueyan¹, LIU Hai², SONG Yanliang², SHAO Jiuning², YANG Xinzhou³

(1. Anhui Hekai Electric Technology Co., Ltd., Hefei, Anhui 231131;
2. Huadian Xinjiang Co., Ltd. New Energy Branch, Urumqi, Xinjiang 832000;
3. Shanghai Kuntuo Electric Technology Co., Ltd., Shanghai 201612)

摘要:【目的】旨在探讨全景热成像感知系统在输变电设备温度状态监测中的应用及其技术优化,以解决传统人工巡检和接触式测温方法效率低、安全性不足等问题,提升电力系统的安全性和智能化水平。【方法】通过结合非接触式红外测温、双光融合(热成像与可见光融合)、多传感器集成(如局放传感器)等技术,系统采用热成像传感器实时采集电力设备温度数据,并基于可视化图像分析、阈值报警及全天候监测功能,实现对设备异常发热的智能化识别与预警。设计了3种高低压系统方案(如热成像传感器与数据平台的有线/无线传输架构),验证其适用性。

【结果】实际应用表明,该系统可在对重点设备部件进行热成像监控,东北某企业10 kV开关站中成功检测到刀闸温度异常(177.5°C),避免了潜在设备故障;其非接触式测温模式避免了金属脱落风险,单台设备可覆盖多目标监测,减少人工巡检工作量。系统支持超温预警($\pm 0.5^\circ\text{C}$ 精度)、历史数据追溯及多种报警机制(如温度突变预警),综合降低企业经济损失达百万元以上。【结论】全景热成像感知系统可优化电力设备运检流程,提升供电可靠性和安全性,为智能电网建设提供重要技术支撑。

关键词:智能电网; 输变电; 全景热成像感知系统; 电力设备巡检; 温度监测; 状态监测

ABSTRACT: [Purpose] This study aims to explore the application and technical optimization of panoramic thermal imaging perception systems in temperature monitoring of power equipment, addressing the inefficiency and safety limitations of traditional manual inspections and contact-based temperature measurement methods, and enhancing the safety and intelligence

of power systems. [Methods] By integrating non-contact infrared temperature measurement, dual-light fusion (thermal imaging and visible light), and multi-sensor technologies (e.g., partial discharge sensors), the system collects real-time temperature data through thermal imaging sensors. It employs visual image analysis, threshold-based alarms, and 24/7 monitoring to intelligently identify and warn of abnormal heating. Three high-low voltage system designs (e.g., wired/wireless transmission architectures) were proposed to validate applicability. [Results] Practical implementation in a 10 kV substation in Northeast China demonstrated successful detection of a blade temperature anomaly (177.5°C), preventing potential equipment failures. The non-contact approach eliminated risks like metal shedding, while multi-target monitoring per device reduced manual inspection workloads. The system achieved overtemperature alerts ($\pm 0.5^\circ\text{C}$ accuracy), historical data tracking, and multiple alarm mechanisms (e.g., sudden temperature changes), reducing economic losses by over CNY 1 million. [Conclusions] The panoramic thermal imaging system optimizes power equipment maintenance processes, improves power supply reliability and safety, and provides critical technical support for smart grid development. Future research should focus on multi-scenario adaptability, sensor integration, and promoting technical standardization for large-scale applications.

KEY WORDS: smart grid ; power transmission ; panoramic thermal imaging sensing system ; power equipment inspection ; temperature monitoring ; condition monitoring

引言

随着我国电力生产和传输规模持续扩大，大型供用电企业在多种设备运维中面临日益严峻的挑战。配电房、开关室等核心区域长期处于高负荷运行状态，设备运行温度异常、电气元件局部放电等关键参数缺乏持续性动态监测，导致绝缘老化、接触不良等潜在风险难以及时捕捉，故障预警与应急响应存在显著滞后性，^[1-4]不仅造成非计划停机损失扩大，更可能引发连锁性电网波动。当前传统运维仍以周期性人工巡检为主力，辅以分散的局放在线监测装置，但在配电类型复杂、设备基数庞大的现实环境下，人工抄录效率低下、巡检路径难以全面覆盖、夜间及恶劣天气隐患漏检等问题突出，加之分布式系统网络化程度不足，设备运行数据分散于独立监控平台形成信息壁垒，温控装置启停、通风散热调节等基础操作仍需人员现场干预，严重制约运维效能。^[5-6]当前电气火灾防控已上升为能源安全战略的重要组成部分。据中央电视台报道，全国火灾形势报告数据显示，2024年1月至10月电气类火灾事故占比持续居首，其复合增长率较上年提升2.4个百分点，（详见图1）凸显传统监测手段存在明显技术代差。通过部署全域感知网络，集成温度、局放、弧垂、电磁应力等多维度实时数据流，构建智能化预警模型，不仅能突破人工巡检的时空限制，更能精准预判设备劣化趋势，推动运维模式从“事后抢修”向“预测性维护”进阶，为电网安全稳定运行提供全时段、全要素的数字化保障。

在输变电设备故障检测与诊断中，全景热成像感知技术是一种基于红外辐射原理、多传感器协同采集与三维温度场建模的非接触式监测技术。该技术通过环形排布的红外热像仪阵列或旋转扫描装置，结合边缘计算、图像拼接算法及故障特征提取方法，实时捕捉变压器、开关柜、输电线路等设备运行时的全表面温度分布，将局部过热、接触不良、绝缘老化等异常发热现象转化为动态可视化的热态图谱。其核心突破在于以厘米级空间分辨率消除传统点式测温的视觉盲区，同步支持带电检测需求，使运维人员能够通过色彩映射、温度梯度标识等视觉元素直观识别故障隐患（如过流、过载或内部缺陷引发的异常升温），显著提升火灾预警、漏电定位及设备状态评估的精准度。^[1,6-10]该技术不仅为电力系统安全稳定运行提供了全天候、全视角

的热状态感知能力，还通过降低非计划性停机风险与能源损耗，推动了电力行业在高效运维、风险防控及可持续发展领域的协同优化。在工程应用中，全景热成像感知技术需严格遵守相关管理制度、行业标准和技术要求，防范潜在风险和其他安全风险，确保电气系统设备和其他组件在运行过程中保持正常运行状态。



图1 全国火灾形势报告及电气火源统计数据

Fig.1 National fire situation report and electric fire source statistical data

1 全景热成像感知系统（SHK-RCX）基本构成

1.1 基本原理

所有温度高于绝对零度（-273℃）的物体都会持续辐射电磁波能量，通过捕获物体的热辐射可实现环境感知。全景热成像感知系统专门接收热红外波段（8 μm~14 μm）的辐射信号，通过精密传感器可将检测到的热能强度转化为对应的灰度数

值^[1,5-6]。不同物体因材质与温度差异会形成特征鲜明的灰度对比，系统将这种热辐射差异转换为不同灰度等级，最终构建出清晰的可视化热力图像，从而实现对目标的精准探测与识别。

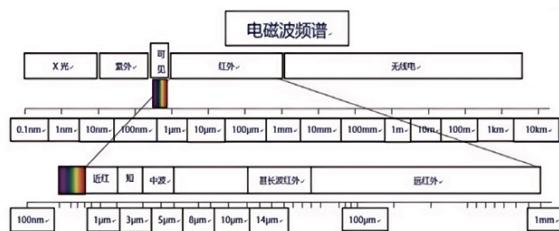


图2 全景热成像感知系统（SHK-RCX）构成原理图
Fig.2 The schematic diagram of the panoramic thermal imaging sensing system (SHK-RCX) is constructed.

1.2 功能特点^[11-17]

(1) 温度检测。

支持点/线/区域测温功能，可实时获取最高温、最低温、平均温及温差数据，具备−20℃~150℃与20℃~550℃双量程自动切换能力，测温精度达±0.5℃或读数值±0.5%（取较大值）。内置温度阈值报警联动机制，支持自定义触发条件。

(2) 双光融合。

集成热成像与200万像素可见光双通道，支持图像融合分析。内置补光单元，确保无光源环境中仍可清晰观测目标细节，增强设备内部环境可视性。

(3) 精准测温技术。

通过前端全景测温直接生成红外图像及原始数据，采用无损抗干扰传输技术，确保测温结果精准稳定。温度数据实时同步至数据库，支持自动报警与历史记录回溯，后端平台可完整追溯温度变化趋势及报警事件。

(4) 全天候监测。

固定式在线监测模块实现7×24小时不间断工作，精准捕捉异常温升，无漏报风险。

(5) 智能温差识别。

无需预设测温框，通过全屏抓图对比自动识别温度突变，简化人工标定流程，操作便捷性显著提升。

(6) 多级报警机制。

支持最高温/平均温显示及超温预警，可根据监测需求选择点、线、框三种模式设置复合规则：框规则：高温大于/小于、低温大于/小于、平均温大于/小于、温差大于/小于；

线规则：高低温及平均温阈值；

点规则：平均温阈值。

示例：设定预警50℃、报警55℃，系统将分级触发温度告警。

(7) 容差温度控制。

设定容差阈值避免温度振荡误报（如容差3℃时，温度需回落至≤52℃才解除55℃触发的报警）。

(8) 扩展传感器集成。

兼容6个点温度传感器及三合一局放传感器（地电波/超声波/超高频），支持433 MHz/LoRa无线传输，实时整合局放数据、温度数值与热成像画面于同一界面。支持无线无源自取电一体化模块或分体式模块选配。

1.3 巡检方案的比较

相较于人工巡检和采用接触式测温传感器进行相关设备的巡检，全景热成像感知系统具有技术及系统优势^[1,6,16-19]，具体见表1。

表1 巡检方案的优缺点

Tab.1 Advantages and disadvantages of inspection scheme

		解决方案	优劣势比较
1	人工巡检		资源需求：人力资源密集型配置 单人单次巡检覆盖半径≤30 m 效能局限： - 巡检周期>8小时/万m ² - 缺失实时监测能力 - 纸质记录转化率较低 - 异常追溯成功率低
2	接触式测温传感器 ^[1]		单节点数据采集 (缺乏空间温度技术局限) 安全隐患： - 金属环脱落风险(可引发相间短路) - 存在局部放电隐患
3	全景热成像感知系统		监测优势： - 多目标同步监测(覆盖半径≥10 m) - 非接触式诊断(电磁兼容设计) - 智能报警阈值(三级预警机制) 运维价值： - 设备异常精准定位 - 隐患提前预判 - 事故率大幅度降低 - 事件全程可追溯 (热谱+视频双证据链)

1.4 系统设计的相关标准

全景热成像感知系统设计严格参照国家电力行业《带电设备红外诊断应用规范》^[20]及国家电网《变电站智能机器人巡检系统技术规范第1部分：变电站智能巡检机器人》^[21]等特高压智能监测技术标准，配置的微型全景红外热成像在线监测系统

可实时追踪配电柜内关键设备的温度变化。该系统通过非接触式探测方式，对开关断路器、避雷器、电容器、电缆接头等设备进行高灵敏度温度监测，当检测到设备运行温度超出安全阈值时，系统将立即触发多级预警机制并锁定异常发热点，为设备全生命周期管理和状态检修提供精准数据支撑。

1.5 价值和意义

在此背景下，供用电企业可依托全景热成像感知系统的三大技术维度构建起主动防御体系：

(1) 智能预判机制。系统采用深度学习算法构建温度场分析模型，实现电气线路及设备的全天候实时监测。当检测到 $\geq 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的异常温升曲线时，触发三级预警响应：初级声光报警（温度偏离基准值15%）、中级自动抓取热力图谱（偏离30%）、高级启动视频追溯录像（偏离50%），形成完整的多模态预警证据链。

(2) 安全监测架构。基于12V微功耗成像模组构建的非接触式检测体系，其等效辐射功率低于 $4 \mu\text{W/cm}^2$ ，设备运行期间平均功耗为9.6 W，在3 m监测距离内实现电磁兼容性，隔离式光耦传输技术可使系统本体与电网保持物理隔离。

(3) 经济防护价值。系统通过早期预警可有效规避三类典型损失：设备层面（开关柜/线路设备烧毁）、生产层面（单次停电事故导致8h~24 h产能损失）、电力供应层面（区域电网保护性跳闸引发的供电中断）。

2 全景热成像感知系统（SHK-RCX）典型的方案设计及其组成

2.1 全景热成像感知系统应用场景

在供用电企业中，可使用全景热成像感知系统

的重点巡检场域和测温对象见表1。

2.2 高低压系统设计方案

(1) 方案1：可视测温传感器→(有线传输)→交换机→数据存储→大屏展示。(见图3)

(2) 方案2：微型测温探头→热成像传感器→网关→(有线传输)→交换机→数据存储平台→大屏展示。(见图4)

(3) 方案3：局放测温多模态传感器→(全景热成像)→交换机→数据存储→大屏展示。(见图5)

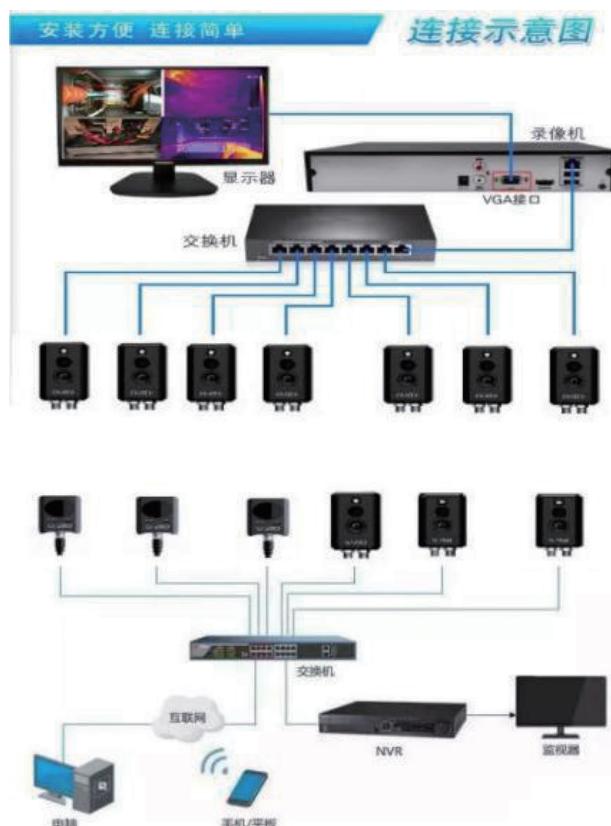


图3 高低压系统设计方案1

Fig.3 High and low voltage system design scheme 1

表2 全景热成像感知系统典型应用场景

Tab.1 Typical application scenarios of panoramic thermal imaging sensing system

重点巡检设备		巡检位置	重点测温对象	解决典型问题
1	6-35kV 高压开关柜	断路器室	上下触头	动触头与静触头咬合不好易造成发热现象
		电缆室	三相搭接头	连接部位各种因素易造成发热现象
2	环网柜	电缆室	三相插拔头	插拔头易插接不好导致发热现象
3	户外变压器	高压进线室	相插拔头	插拔头易插好导致发热现象
4	干式变压器	壳体与铁芯	本体	过载或长时间运行易造成发热现象
5	低压柜	抽屉	接头	连接部位各种因素易造成发热现象
6	电容柜	断路器室	上下触头	动触头与静触头咬合不好易造成发热现象

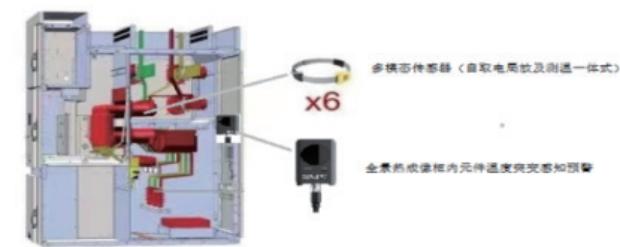


图 4 高低压系统设计方案 2

Fig.4 High and low voltage system design scheme 2

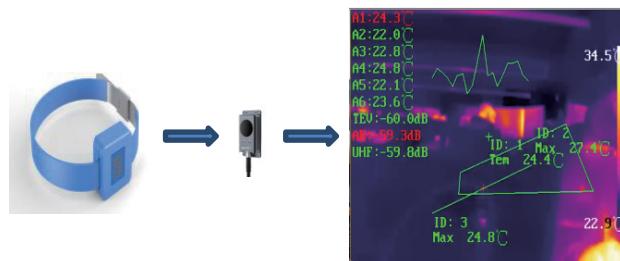


图 5 高低压系统设计方案 3

Fig.5 High and low voltage system design scheme 3

3 全景热成像感知系统的应用效果

(1) 螺丝接头及红外效果 (见图 6)。



图 6 螺丝接头及红外效果

Fig.6 Screw joint and infrared effect

(2) 断路器接头及红外效果 (见图 7)。

(3) 汇控柜继电器及红外效果 (见图 8)。

(4) 综合方案应用效果。



图 7 断路器接头及红外效果

Fig.7 Circuit breaker connector and infrared effect

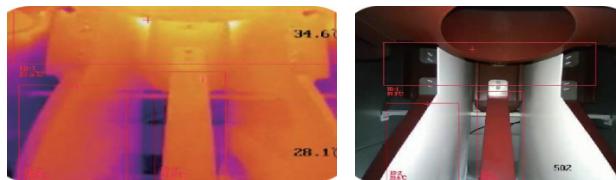


图 8 汇控柜继电器及红外效果

Fig.8 Relay and infrared effect of control cabine

东北某大型企业在其 10 kV 开关站实施配电无人值守智能巡检升级时，经方案比选后采用安徽合凯电气全景热成像感知系统（SHK-RCX）在线可视化测温方案，项目运行成效显著。2021 年 10 月 28 日，系统在热轧车间配电室开关柜监测中，成功捕捉刀闸于负荷高峰时段异常升温至 177.5 ℃，（见图 9）显著超出安全阈值，提前预警设备运行隐患。



图 9 东北某企业 10 kV 开关站配电无人在线巡检智能化工作界面

Fig.9 An intelligent working interface for unmanned on-line inspection of power distribution in 10 kV switch station of an enterprise in Northeast China

4 结束语

智能电气设备全景热成像感知系统构建了“预防性运维 + 智能化诊断”的双重保障体系，在电气设备温度场监测领域展现出独特优势。该系统有助于推动电力企业运检一体化进程，提升设备运维效率，有效缓解因电网扩容加速带来的运检人力缺口。

压力，和跨专业协同的沟通协调时间，压缩停电时长，提升供电可靠性。展望未来发展，随着多光谱融合技术和边缘计算架构的深度应用，全景热成像感知系统将向“全域感知-自主决策-主动防御”的第三代智能运维体系演进。

参考文献

- [1] 黄新波,蒋兴良.智能电网输电线路在线监测技术进展[J].广东电力,2014,27(6):72-76.
HUANG Xinbo, JIANG Xingliang. Progress of Smart Grid Power Transmission Line Online Monitoring Technology [J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(6): 72-76.
- [2] 王国胜,梁瑞玲,舒应军.输电线路在线监测可靠性评价方法[J].电瓷避雷器,2013 A(254)89-92.
- [3] 赵文彬,李慧星,费正明,等.基于智能电网需求的输电线路状态监测系统建设[J].华东电力,2010,38(8): 1212-1216.
ZHAO Wenbin, LI Huixing, FEI Zhengming, et al. Construction of Transmission Line State Detection System Based on Smart Grid Requirements [J]. East China Electric Power, 2010, 38(8): 1212-1216.
- [4] 王翔宇,陈武晖,郭小龙,等.发电系统数字化研究综述[J].发电技术,2024,45(1):120-141.
WANG X Y, CHEN W H, GUO X L, et al. Review of research on the digitalization of power generation system[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 120-141.
- [5] 王凯,蔡炜,邓雨荣,等.输电线路在线监测系统应用和管理平台[J].高电压技术,2012,38(5): 1274-1280.
WANG Kai, CAI Wei, DENG Yurong, et al. Application and Management Information Platform for Transmission Line Monitoring System [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(5): 1274-1280.
- [6] 赵荣.输电线路的状态检修管理[J].贵州电力技术,2014,17(3):64-65.
ZHAO Rong. Management of Condition Based Maintenance for Transmission Line [J]. Guizhou Electric Power Technology, 2014, 17(3): 64-65.
- [7] 黄新波,李国倡,赵隆.智能电网输电线路在线监测与故障诊断综合系统[J].华东电力,2011,39(12):1998-2003.
- [8] 郝登朴,卫宁,贞鹏,等.500 kV变电站智能巡检系统关键技术的应用[J].电力学报,2009,24(6):509-511.
HAO Dengpu, WEI Ning, YUN Peng, et al. The Key Technology and the Application of Intelligent Visiting and Inspecting System in 500 kV Transformer Sub-station [J]. Journal of Electric Power, 2009, 24(6): 509-511.
- [9] 张连芹,陈昊.在线监测系统中GIS技术的开发与应用[J].电网与清洁能源,2015,31(4):42-46.
ZHANG Lianqin, CHEN Hao. Development and Application of GIS Technology in the On-Line Monitoring System [J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(4): 42-46.
- [10] 阮存钦,洪志刚,赖培灿,等.基于在线监测数据的燃煤电厂脱硝装置性能预测研究[J].发电技术,2023, 44(1): 100-106.
RUAN C Q, HONG Z G, LAI P C, et al. Research on performance prediction of coal-fired power plant denitrification device based on online monitoring data[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(1): 100-106.
- [11] 陈诚.输电线路状态检修与智能决策系统[D].北京:华北电力大学,2016.
- [12] 程远,韦磊,朱红.无线Mesh网络在输电线状态监测系统中的应用[J].电力系统通信,2012,33(7):31-34.
CHENG Yuan, WEI Lei, ZHU Hong. Application of Wireless Mesh Network in Power Line Status Surveillance System [J]. Telecommunications for Electric Power System, 2012, 33(7): 31-34.
- [13] 仇英辉,刘超.智能输电线路信息采集与状态监测系统[J].南方电网技术,2014,8(1):42-45.
QIU Yinghui, LIU Chao. The Information Gathering and Condition Monitoring System of Intelligent Transmission Lines [J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(1): 42-45.
- [14] 刘新,阎立军,卫鹏,等.输电线路在线监测通信技术研究及应用[J].中国电业(技术版),2014(9):16-18.
LIU Xin, YAN Lijun, WEI Peng, et al. Research and Application of On-line Monitoring Communication Technology for Transmission Lines [J]. China Electric Power (Technology Edition), 2014(9): 16-18.
- [15] 范晓狄,万文略,郑银.一种改进的高斯-拉普拉斯金字塔互感器红外图像增强算法[J].电力科技与环保,2024,40(2):198-206.
FAN Xiaodi, WAN Wenlue, ZHENG Yin. An Improved Gaussian Laplace Pyramid Transformer Infrared Image Enhancement Algorithm [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2024, 40(2): 198-206.
- [16] 芦春阳,王沾,杨柳青,等.智能变电站容性设备绝缘远程在线监测装置研究[J].电力学报,2014,29(4):356-360, 366.
LU Chunyang, WANG Zhan, YANG Liuqing, et al. Study on the Remote Online Monitoring Device of Intelligent Substation's Capacitive Equipment Insulation [J]. Journal of Electric Power, 2014, 29(4): 356-360, 366.

of Electric Power,2014,29(4):356–360,366.

- [17] 杨威龙, 张东彦, 黄明, 等. 输电线路状态远程监测系统设计 [J]. 北方工业大学学报, 2013,25(3):24–30.

YANG Weilong,ZHANG Dongyan,HUANG Ming,et al. Design of Remote Monitoring System for Transmission Line Status [J]. Journal of North China University of Technology, 2013,25(3):24–30.

- [18] 杨毅. 输电线路状态监测系统的研究与应用 [D]. 合肥: 安徽工业大学, 2020.

- [19] 林旗力, 余飞, 宋凯. 基于实测的城市220kV户内变电站站界电磁环境分析 [J]. 电力科技与环保, 2022,38(01):56–64.

LIN Qili, YU Fei, SONG Kai. Field measurements study on electromagnetic environment at boundaries of 220kV indoor substations in urban areast [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection,2022,38(01):56–64.

- [20] 国家发展和改革委员会. 带电设备红外诊断应用规范 DL/T 664—2008 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2008. National Development and Reform Commission of PRC. Application Rules of Infrared Diagnosis for Live Electrical Equipment [S]. Beijing:China Electric Power Press,2008.

- [21] 国家电网公司. 变电站智能机器人巡检系统技术规范 第1部分: 变电站智能巡检机器人 Q/GDW 11513.1—2016 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.

State Grid Corporation of China. Technical Specification for Intelligent Robot Inspection System in Substation-Part 1: Intelligent Robot for Substation Inspection Q/Gdw 11513.1—2016 [S]. Beijing:China Electric Power Press, 2016.

收稿日期: 2023-10-25。

作者简介:



童雪燕, 女, 高级机电工程师、高级电气工程师、BIM 高级工程师、装配式高级工程师、二级机电建造师。企业研究生导师。深耕中压配电网故障防控及电能质量治理领域, 在短路电流超标治理、电压暂降治理等复杂技术难题上具备深厚的理论分析与系统优化能力。

13866778709@126.com

童雪燕



刘海 (1973), 男, 研究方向为电力工程建设及与之相关的新技术、新工艺、新材料研发及其运用, 108865297@qq.com

刘海



宋延良 (1991), 男, 工程师, 研究方向为工程建设管理, 289641728@qq.com

宋延良



邵久柠 (1987), 男, 工程师, 研究方向为电力工程施工, 电气设备自动化技术, shaojiuning@126.com

邵久柠



杨新州, 硕士, 工程师, 研究方向: 过电压过电流保护, 快速识别与判断测控技术, 快速开关, 连续稳定供电, 项目管理。

杨新州