

文章编号: 2095-4980(2021)06-1091-06

基于 GM-Markov 模型的线缆温度预警系统设计

王晶晶, 汪鹏君, 崔毅, 施一剑

(温州大学 电气与电子工程学院, 浙江 温州 325035)

摘要: 针对电力线缆分布情况复杂、缺乏全面有效预警手段等问题, 提出基于灰色马尔科夫(GM-Markov)模型的线缆温度预警系统。首先分析温度预警系统设计总体结构以及数据通信方式, 通过采用 LoRa 和 GPRS 相结合的方式, 保证数据采集的可靠性; 其次, 通过灰色马尔科夫模型预测线缆温度, 将预测结果用线缆温度预警模型进行故障判断, 提高预警系统准确性; 最后, 通过实验验证线缆温度预警的可行性, 并构建线缆温度分级预警平台, 实现将各种故障信息及时推送给企业管理人员, 达到实时预警的目的。

关键词: 灰色马尔可夫模型; 温度预警模型; 预警平台; 故障推送

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020059

Design of cable temperature pre-warning system based on GM-Markov model

WANG Jingjing, WANG Pengjun, CUI Yi, SHI Yijian

(College of Electrical and Electronic Engineering, Wenzhou University, Wenzhou Zhejiang 325035, China)

Abstract: Aiming at the problems of complex distribution and the lack of comprehensive and effective pre-warning methods for power cables, a cable temperature pre-warning system based on the Gray Markov model is proposed. Firstly, the overall structure of the temperature pre-warning system and the data communication method are analyzed. The communication method combining Long Range(LoRa) and General Packet Radio Service(GPRS) is utilized to ensure the reliability of data acquisition. Secondly, the gray Markov model is adopted to predict the cable temperature. The prediction result is collected for fault identification in a cable temperature pre-warning model to improve the accuracy of the pre-warning system. Finally, the feasibility of the cable temperature pre-warning is verified by experiments and an early warning platform is built for cable temperature classification. The timely notification of various faults to enterprise management personnel is realized by this means.

Keywords: GM-Markov model; temperature pre-warning model; pre-warning platform; fault notification

电力系统中, 温度是电力设备稳定运行的重要指标。通常, 配电设备缺陷会以温度异常方式体现^[1-2], 而设备故障多由线缆温度异常引起。因此, 设计线缆温度预警系统, 实现线缆温度实时监测和故障预警, 并提醒运行维护人员进行相关处理, 是保证设备安全稳定运行的必要措施^[3]。随着故障预警不断发展, 合理有效地将电力数据与相应预警模型结合产生预警信息, 是保证配电网安全稳定运行的必要前提。根据预警信息实现预知性检修, 是进一步提高电力系统管理水平的有效方式^[4-5]。目前, 电力监测平台多数实现了电力台账、用户管理、在线监测等功能, 但实际应用中预警效果不是很理想。

电力预警系统可通过统计学的回归算法、基于人工智能的支持向量机算法、神经网络以及小波分析等进行故障预测, 从而达到故障预警的目的。文献[6]针对支持向量机参数选择会影响预测结果的问题, 引入了粒子群优化算法来动态寻优标准化参数, 提高电缆接头温度预测精确度。文献[7]针对变电站后台操作系统和计算机监测管理软件系统交互困难的问题, 提出周期动态变化轮询策略设计友好易用的监测与诊断工具, 达到提前告知可能存在的问题和隐患的目的。文献[8]针对目前电力监控系统无法远程运维一体化的问题, 提出构建站、区域

和运维三级应用功能部署方案，提高了系统预警、故障定位的自动化程度。

上述研究通过算法、平台交互等手段，在一定程度上提高了预警系统的准确性，但温度预警系统准确性要求较高，预警效果还不是很理想。因此采用超长距低功耗数据传输技术(LoRa)和通用分组无线服务技术(GPRS)结合的通信方式采集线缆温度数据，运用结构简单且运算效率高的 GM-Markov 模型和电力线缆温度预警模型建立温度分级预警模型，达到故障实时预警的目的。

1 温度预警系统构成

温度预警系统通过电力数据采集装置实时采集温度数据，结合通信系统、在线监测系统及故障预警模型实现故障分级实时预警。同时为了提高温度预警系统的可靠性和故障判断的精确性，将灰色马尔科夫模型与电力线缆温度预警模型结合，综合判断设备工作状态实现故障分级预警。故障实时预警系统如图 1 所示。

电力采集设备与传感器、服务器之间通信方式有 RS485、CAN 总线、LoRa、GPRS 和载波等。目前市面上数据采集与控制系统通信方式多数为 RS485，而 LoRa 优点是超长距离、低功耗数据传输，选用 LoRa 技术进行局域网，代替传统 RS485 总线，解决局域连接数过多出现掉线的问题。GPRS 相对其他传输方案的优点是覆盖广，成本低，损耗少等^[9]，利用 GPRS 连接服务器，将 LoRa 局域网的数据进行打包发给服务器，保证在复杂环境下超远距离传输数据的可靠性，降低建设成本。根据通信方式的优缺点和实际应用场景，选用 LoRa 和 GPRS 通信结合的方式。各通信方式的比较如表 1 所示。

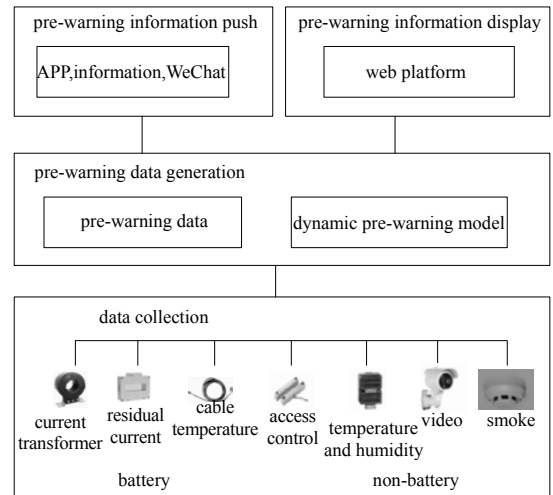


Fig.1 Real-time fault warning system
图 1 故障实时预警系统

表 1 通信方式比较

Table1 Comparison of communication modes

| communication mode | reliability | real-time (transmission rate) | power consumption | economical |
|--------------------|-------------|-------------------------------|-------------------|------------|
| GPRS | higher | 9-117.2 kbit/s | low | low cost |
| LoRa | higher | 18-several hundred kbit/s | low | low cost |
| optical fiber | high | 100 Mbit/s | low | high cost |
| carrier wave | general | 50-300 bit/s | high | low cost |
| RS485 | high | 9 600 bit/s | high | low cost |

2 温度预警模型

电力线缆温度预警可通过设定阈值实现，当系统某一参量超过阈值时系统启动报警。针对典型的温度变化引起的故障，通过灰色马尔科夫模型预测得到温度值后，结合线缆温度预警模型提前预知设备故障隐患，从而进行分级预警，做到防患于未然。

2.1 灰色马尔科夫模型

灰色预测用于拟合配电网相关数据变化趋势，马尔科夫概率矩阵用来确定状态转移规律。两者结合弥补灰色预测在数据具有随机性和波动时拟合效果较差的问题。若采集数据满足灰色预测模型和马尔科夫预测模型条件即可进行灰色马尔科夫预测。将灰色预测模型得到的灰色预测值与马尔科夫模型状态区间结合，取状态区间 $E_i=[E_{1i}, E_{2i}] (i=1,2,\dots,n)$ 的中间值作为温度预测值，灰色马尔科夫预测模型 $U(k)$ 为：

$$U(k) = \frac{1}{2(E_{1i} + E_{2i})} = u(k) + \frac{1}{2(A+B)k} \quad / = 1, 2, \dots, n \tag{1}$$

式中： $u(k)$ 为灰色预测温度值； E_{1i}, E_{2i} 分别平行于预测曲线的上下限， $E_{1i}=u(k)+A$ ， $E_{2i}=u(k)+B$ ， A 、 B 的值可根据经验确定。

选取数据进行灰色马尔科夫预测，得到第一个预测的新数据。将新的预测数据加入数据序列，去除原始序

列的第一个数据，形成一个新的数据序列，以新的数据序列再次优化灰色马尔科夫温度预测模型。依据上述方法循环递推得到预测值，将最终预测结果用线缆温度模型再次判断，通过两者结合提高预警系统的准确性。

2.2 线缆温度预警模型

温度阈值法是故障预警的有效方法，但温度阈值法一般在线缆温度达到某个极限时才会报警，且电力设备工作在小电流接触故障时产生的温度无法触发温度阈值报警。实际应用中阈值预警会受到一定的干扰，如电磁、尖峰脉冲等干扰，因此考虑到监测节点受到的干扰，预测值达到一级预警阈值则立即进行报警，若到达二级预警阈值(一级预警值大于二级预警值)则通过同类温差比较法、温度变化率以及温度偏差进行再次判断，方法如下。

同一电气回路中三相电流正常情况下基本相同，三相间同类连接部位线缆温度变化基本一致，同类温差比较可解决线缆温度测量受到环境因素影响的问题。同类温差是指三相线缆在相同环境下相邻部位之间的比较。因此可根据同类温差判断设备是否正常工作。相间温差 ΔT 由 $\Delta T=T_1-T_2$ 求出，其中 T_1 为同类相间最高温度， T_2 为同类相间最低温度。

传感器检测到的温度数据是一个变化的数值，当数据变化较大时线缆温度迅速上升，短时间内可能会超过线缆所能承受的最大值。所以，温度变化率也是线缆由于高温引起事故的重要参数。对温升变化率设定一个阈值，当温升大于阈值时进行预警，使得同类温差法在三相同类参考点同时出现故障时仍然可以做出有效预警。温度变化率 S 由式(2)得出：

$$S = (T_1 - T_2) / (t_1 - t_2), t_1 > t_2 \tag{2}$$

式中： T_1 为 t_1 时刻温度； T_2 为 t_2 时刻温度。

DL/T664—2016《带电设备红外诊断技术应用导则》列举了电气设备电流、电压致热型相对温差判据，因此可根据该导则判断温差是否会造成设备损坏。同时根据 GB/T11022—2011 标准规定的对应最高允许温度值与线缆发热点温度进行比较，从而进行温度阈值报警。

电力线缆预警按照阈值法、同类温差比较法、温度变化率以及温度偏差进行分级预警。智能电力采集装置每秒采集一个点，将采集数据的最新数据作为预测的原始数据，利用灰色马尔科夫预测温度 T ，并将温度 T 与环境温度差、相间温差、温度变化率以及最高允许阈值作为判别故障判据，达到一级报警条件(线缆承受的最高温度)则立即输出预警信息，未达到一级预警时进行二级判断，若 3 种方法有一个达到报警条件则输出预警信息。温度对设备的危害程度分为严重性和危害性，一级报警输出红色，二级报警输出橙色，无报警信息输出绿色。温度预警流程图如图 2 所示。

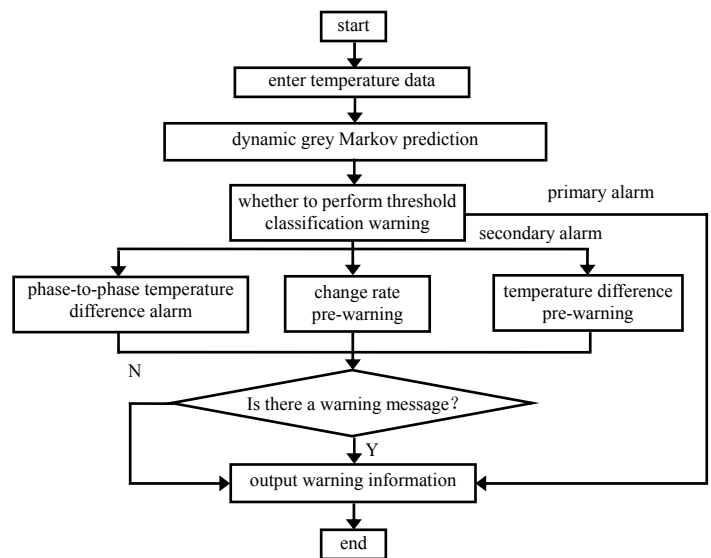


Fig.2 Flow chart of temperature early warning
图 2 温度预警流程图

3 温度预警系统实现

3.1 实验验证

为方便模拟同类温差和变化率预警实验，搭建实验验证平台如图 3 所示。三相电路温升过程中电流一致，线缆粗细相同，则三相线缆发热过程具有相似性。实验时将温度传感器接在空开三相出线端同一位置，且接入相同电阻器作为负载。将出线端其中一相拧松动模拟故障，采集数据并上传到监控预警平台，预警系统实时数据如图 4 所示。图中 C 相温度在接线端产生故障时，

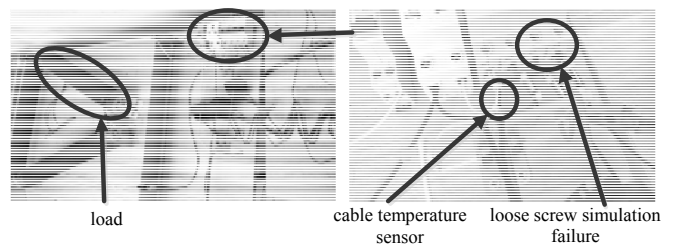


Fig.3 Fault test platform of cable temperature
图 3 线缆温度故障实验平台

温度快速上升，温差逐渐增大；若三相同同时松动，温度同时上升，上升率增大。此时系统产生故障，但没有达到故障报警的阈值，根据灰色马尔科夫模型预测的温度以及二级预警判断，产生预警信息。

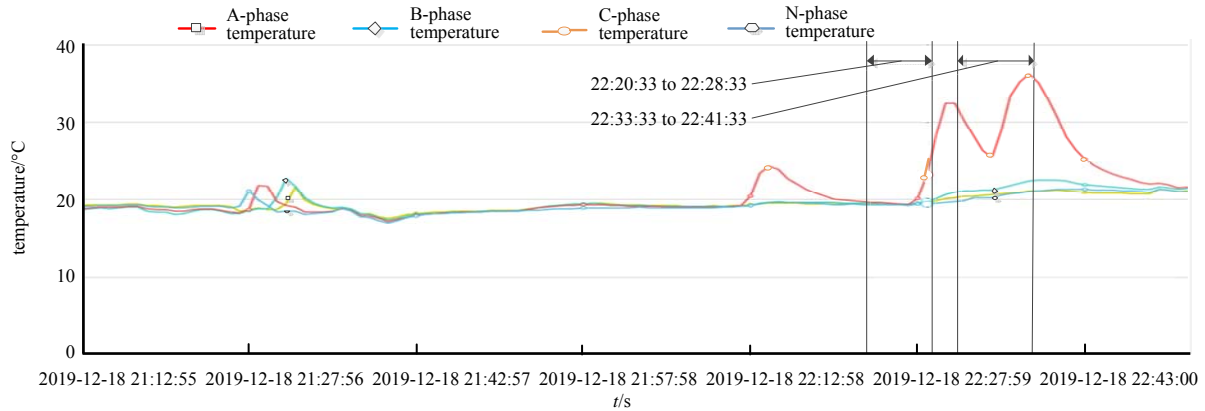


Fig.4 Test data of cable temperature
图 4 线缆温度实验数据

将图 4 所示 22:20:33 到 22:28:33 时段和 22:33:33 到 22:41:33 时段之间的 C 相实际数据代入灰色温度预测模型和灰色马尔科夫温度预测模型，分别得到预测值，并将其与原始数据数列比较，两组数据所得变化趋势如图 5 所示。具体误差如表 2 所示。

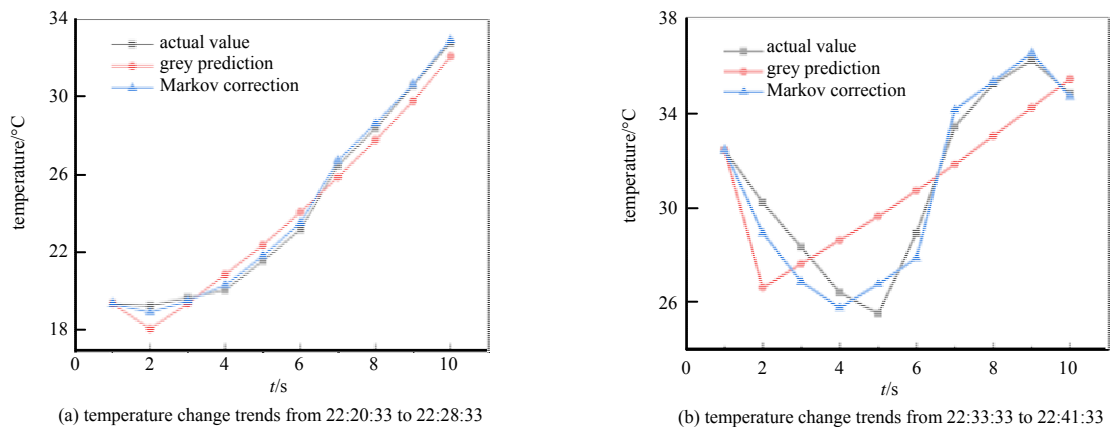


Fig.5 Trends of temperature change
图 5 温度变化趋势图

表 2 22:20:33 到 22:28:33 时段温度预测值以及相对误差值

Table 2 Temperature prediction and relative error between 22:20:33 and 22:28:33

| actual value | grey prediction | grey relative error | Markov correction | Markov relative error |
|--------------|-----------------|---------------------|-------------------|-----------------------|
| 19.4 | 19.4 | 0 | 19.40 | 0 |
| 19.3 | 18.1 | 1.2 | 18.95 | 0.35 |
| 19.7 | 19.4 | 0.3 | 19.60 | 0.10 |
| 20.1 | 20.8 | -0.7 | 20.35 | -0.25 |
| 21.6 | 22.3 | -0.7 | 21.85 | -0.25 |
| 23.2 | 24.0 | -0.8 | 23.55 | -0.35 |
| 26.5 | 25.7 | 0.8 | 26.55 | -0.05 |
| 28.4 | 27.5 | 0.9 | 28.35 | 0.05 |
| 30.6 | 29.5 | 1.1 | 30.35 | 0.25 |
| 32.8 | 31.6 | 1.2 | 32.45 | 0.35 |

由图 5 和表 2、表 3 可知所提基于灰色马尔科夫的温度预测模型可以更精确地反映线缆温度变化趋势。灰色马尔科夫模型克服了灰色预测在原始数据具有波动时预测精确度较低的缺陷，可更好拟合具有波动的数据。灰色预测模型可反映温度数据变化规律，马尔科夫概率矩阵可反映下一时刻温度状态转移规律，将两者结合提高了预测精确度。

表 3 22:33:33 到 22:41:33 时段温度预测值以及相对误差值
Table3 Temperature prediction and relative error between 22:33:33 and 22:41:33

| actual value | grey prediction | grey relative error | Markov correction | Markov relative error |
|--------------|-----------------|---------------------|-------------------|-----------------------|
| 32.4 | 32.4 | 0 | 32.40 | 0 |
| 30.2 | 26.6 | 3.6 | 28.90 | 1.30 |
| 28.3 | 27.6 | 0.7 | 26.85 | 1.45 |
| 26.4 | 28.6 | -2.2 | 25.75 | 0.65 |
| 25.5 | 29.6 | -4.1 | 26.75 | -1.25 |
| 28.9 | 30.7 | -1.8 | 27.85 | 1.05 |
| 33.4 | 31.8 | 1.6 | 34.10 | -0.70 |
| 35.2 | 33.0 | 2.2 | 35.30 | -0.10 |
| 36.2 | 34.2 | 2.0 | 36.50 | -0.30 |
| 34.8 | 35.4 | -0.6 | 34.66 | 0.14 |

3.2 功能实现

线缆温度预警平台采用 B/S 结构进行设计，即浏览器和服务器结构。服务器通过 TCP 协议获取智能电力设备终端所采集的数据，并将数据存储到 MySQL 数据库。考虑到系统终端数量较多且数据发送频繁，采用心跳机制来处理客户端的连接状态，实现客户端与服务器长连接、高并发的场景，完成 TCP/IP 的连接和数据的收发。该预警系统在实现电力设备日常运行管理所需功能的基础上，增加新的预警机制实现及时预警，并将预警信息通过微信推送给相关人员，达到实时预警的目的。监测系统具有的功能有：基础数据管理模块、设备管理模块、数据采集与监控系统(Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA)等。电力预警平台软件系统功能如图 6 所示。

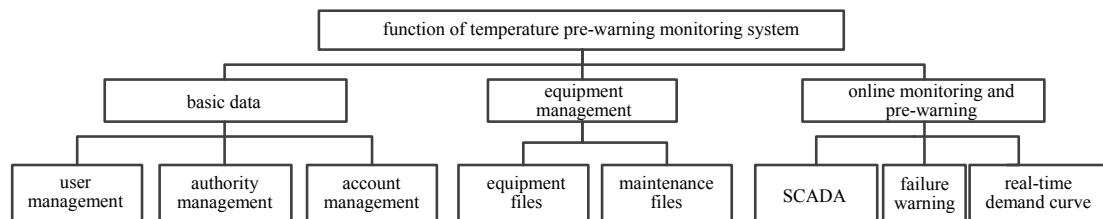


Fig.6 Architecture of power early warning platform

图 6 电力预警平台软件系统功能

3.2.1 数据采集及上传

监测数据由线缆温度传感器、电流互感器和温湿度传感器等采集，监测数据采用固定时间上传机制，按照设定的时间定时将监测数据上传到配电系统中心机房的服务器上。对于故障报警数据采用立即上传的机制，配电中心服务器对监测到的电力数据通过故障预警模型进行预测，判断出现故障则立即将数据上传至中心机房，保证了智能采集设备电池的使用寿命。

3.2.2 预测数据可视化

数据可视化模块用于向用户直观地展示数据分析结果，将实时数据、历史数据以及故障报警数据以图表的方式展示。预警系统会将故障预测的结果以醒目的图标显示，使相关用户及时准确掌握电力设备运行状况。同时通过同比、环比、占比等统计分析，实时生成相应报表，以 PDF 文件形式导出，以使用户查阅和存档。

3.2.3 智能故障预警

硬件数据采集系统设置每秒采集一次数据，将最新数据作为预测样本，利用灰色马尔科夫模型进行滚动更新预测未来时刻的温度值，将预测结果用温度预警模型进行故障判断，提前预测各类故障并以以下方式告知相关人员，预防重大电力事故的发生。告警弹窗提示：发生故障时，系统会立即在系统页面左下角弹出报警设备信息，点击弹窗即可查看故障详情。告警电话提示：电力系统发生故障时，系统立即发出故障报警声音，若故障较多，管理人员可将此声音提示关闭再处理故障，同时弹出报警电话窗口，及相应报警地

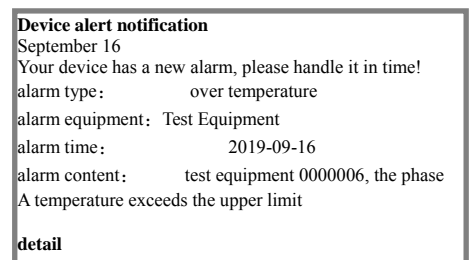


Fig.7 WeChat alarm pushing information

图 7 微信报警推送信息

点工作人员电话等信息,实现及时报警。微信告警推送:当系统收到告警消息后,把告警消息发送给相关人员,即使监测或运维人员不方便打开电力预警平台,也能实时掌握故障告警信息,微信报警推送信息见图7。

4 结论

本文在电力故障监测的基础上提出了温度预警系统的总体框架。通过结构简单、运算速度较快的灰色马尔科夫模型与线缆温度预警模型相结合实现线缆温度故障预警,提高了预警系统的准确性。同时,利用微信进行故障推送,极大降低了故障消息推送的成本。线缆温度预警系统实现了故障分级预警,有利于解决电力系统预警信息不及时的问题,可为运维人员提供有效的预警信息,具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 黄新波,薛智鹏,田毅,等. 高压开关柜热故障预警策略及其应用[J]. 电力自动化设备, 2019,39(7):181-187. (HUANG Xinbo,XUE Zhipeng,TIAN Yi,et al. Thermal fault early warning strategy of high voltage switchgear and its application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(7):181-187.)
- [2] 陈本彬,陈明华,庄志坚,等. 开关柜动态预警无线温度监测系统[J]. 自动化仪表, 2019,40(5):39-43. (CHEN Benshan,CHEN Minghua,ZHUANG Zhijian,et al. Design of dynamic early warning wireless temperature monitoring system for switchgear[J]. Process Automation Instrumentation, 2019,40(5):39-43.)
- [3] 漆灿,李庆武,郑云海,等. 基于智能视觉物联网的变电站红外监测系统[J]. 电力系统保护与控制, 2018,46(15):135-141. (QI Can,LI Qingwu,ZHENG Yunhai,et al. Substation infrared monitoring system based on intelligent vision internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2018,46(15):135-141.)
- [4] 刘丰,曾祥君,谷应科,等. 基于行波技术的电力线路绝缘预警系统及其现场试验[J]. 南方电网技术, 2019,13(6):24-29. (LIU Feng,ZENG Xiangjun,GU Yingke,et al. Power line insulation early warning system based on traveling wave technology and its field test[J]. Southern Power System Technology, 2019,13(6):24-29.)
- [5] 李震宇,武国亮,王志利,等. 电力微气象风偏灾害监测预警技术及系统实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017,45(1):125-131. (LI Zhenyu,WU Guoliang,WANG Zhili,et al. Monitoring and early warning technology and system implementation of power micro-meteorological wind bias disaster[J]. Power System Protection and Control, 2017,45(1):125-131.)
- [6] 樊浩,宁博扬,何森. 基于SVM改进 PSO算法的电缆接头温度预测分析[J]. 电子测量技术, 2019,42(21):53-56. (FAN Hao,NING Boyang,HE Sen. Prediction and analysis of cable joint temperature based on SVM improved PSO algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2019,42(21):53-56.)
- [7] 邓科,张海庭,孙振,等. 智能变电站站控层设备监测系统设计与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018,46(19):165-170. (DENG Ke,ZHANG Haiting,SUN Zhen,et al. Design and application of monitoring system for intelligent substation station control layer equipment[J]. Power System Protection and Control, 2018,46(19):165-170.)
- [8] 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):164-172. (ZHANG Qiaoxia,WANG Guangmin,LI Jianglin,et al. Design and implementation of remote substation operation and maintenance platform[J]. Power System Protection and Control, 2019,47(10):164-172.)
- [9] XIAO Zhenjun,FAN Yingying,WANG Wenfei,et al. The semileptonic decays of B/S meson in the perturbative QCD approach: a short review[J]. Chinese Science Bulletin, 2014(59):29-30.

作者简介:

王晶晶(1991-),女,在读硕士研究生,主要研究方向为电力系统自动化.email:13758799636@163.com.

崔毅(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统自动化.

汪鹏君(1966-),男,教授,主要研究方向为低功耗集成电路设计.

施一剑(1989-),男,博士,讲师,主要研究方向为纳米传感器检测系统及信号处理.