

基于移动式红外测温的变电站设备 温度预警系统

周敬嵩¹, 俞京锋¹, 唐圣丰², 杨欢红³, 朱斌泉¹, 丁宇涛³

(1. 国网浙江德清县供电公司, 浙江 德清 313200; 2. 德清欣电电力建设有限公司, 浙江 德清 313200;
3. 上海电力大学电力工程学院, 上海 200090)

摘要:目前, 变电站人工巡检效率低, 对电气设备的测温准确率不高, 导致不能对潜在的异常设备进行预警。针对此现状, 提出了一种基于移动式红外测温的变电站设备温度预警系统。系统以巡检机器人为移动平台, 结合红外测温、WiFi 通讯、远程监控显示等新技术, 可对变电站设备进行测温预警。在此基础上, 进一步分析导致红外测温误差的影响因素, 采用 BP 神经网络对红外测温误差进行修正。系统结合绝对测温预警和相对温差预警方式, 达到理想的预警效果。该系统已在德清变电站成功投入运行, 证明了系统的合理性和可靠性。

关键词:巡检机器人; 移动平台; 红外测温; BP 神经网络; 预警

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.022 中图分类号: TM915.03 文章编号: 1673-9140(2020)01-0163-06

Research on temperature early warning system for substation equipments based on the mobile infrared temperature measurement

ZHOU Jingsong¹, YU Jingfeng¹, TANG Shengfeng²,
YANG Huanhong³, ZHU Binqun¹, DING Yutao³

(1. Deqing Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Deqing 313200, China; 2. Deqing Xindian Construction Co., Ltd., Deqing 313200, China; 3. College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric of Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Nowadays, the manual inspection is considered as a low efficiency way for substation inspection. The potential abnormal for equipments might not be warned since. The temperature measurement of electrical equipments is inaccurate. Therefore, an temperature early warning system for substation equipments is proposed based on the mobile infrared temperature measurement in this paper. This system takes the inspection robot as a mobile platform and new technologies such as infrared temperature measurement, WiFi communications and remote monitoring display, etc are incorporated. It is able to conduct temperature measurement early warning. In addition, the effects factors of infrared temperature measurement error are analyzed and the BP neural network is employed to modify the infrared temperature measurement errors. The proposed system combines the absolute and relative temperature measurements early

warning method so as to achieve the ideal early warning effect. It has been run successfully in Deqing substation to verify its rationality and reliability.

Key words: inspection robot; mobile platform; infrared temperature measurement; BP neural network; early warning

随着中国电网技术日益发展,自动化水平不断提高,作为电网枢纽的变电站趋于无人值守化。变电站在电力系统中发挥着关键的作用,经济价值重大,安全防范的重要性不言而喻。温度是标识变电站设备状态的一个重要指标,设备温度过高会降低材料的绝缘强度,减少设备的使用寿命,甚至会引起火灾等事故的发生^[1-3]。传统的人工巡检,工作人员需要定期到变电站现场,通过手持红外测温仪测量电气设备的温度,存在劳动强度大,工作效率低等问题。

近年来,电网建设的迅速发展,在线监测系统在变电站的应用日趋广泛,变电站利用无线测温系统采集设备的温度数据^[4-5]。从变电站实际应用的效果来看,相比传统人工使用红外测温仪的方法提高了效率,但是在线监测系统的使用仍然存在一定的局限性。主要表现在:①系统需要对全站设备进行监测,设计复杂,费用昂贵;②系统内的监测设备本身容易受到电磁干扰、灵敏度等影响,准确率不高;③整个系统后期的运行维护、管理费用很大;④缺乏利用所获取的温度数据来分析诊断电气设备潜在的故障。

综合考虑上述的局限性,研究设计了一种基于移动式红外测温的变电站设备温度预警系统。系统以巡检机器人作为移动平台,使用红外测温仪在线采集设备的温度,综合考虑环境温度、负载电流等因素通过BP神经网络对所测数据进行修正。温度异常的预警方式以绝对测温预警和相对温差预警方式相结合,以浮动阈值进行阈值整定,规避传统固定阈值所导致的误报和漏报。该系统已在德清变电站成功运行,证明了系统的合理性和可靠性。

1 系统的组成

移动式红外测温预警系统是以巡检机器人作为移动平台的,用于在巡检时采集、存储、传输和查询变电站关键设备的温度数据,判断设备是否存在异常

或者潜在故障的综合自动化系统。该文设计的系统总体结构如图1所示。

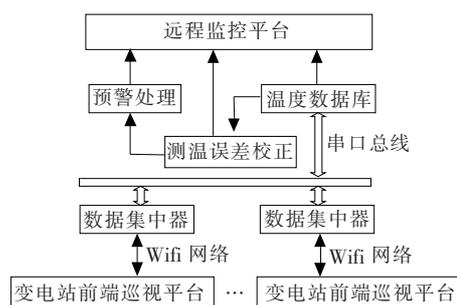


图1 移动式红外测温预警系统总体结构

Figure 1 Overall structure of infrared temperature measurement and alarm system

在该系统中,前端巡视平台以机器人为移动平台,机器人主要包含车载服务器、底层移动小车、抬升装置、旋转云台、机械手臂等几大部分,搭载红外测温仪、温度传感器等各类监测装置,并提供自动充电的接口。机器人控制芯片部分要将各种采集信息和控制信号以及IO通道的状态信息等信号按照一定的顺序发送至网卡芯片,然后控制网卡将信息打包并以数据包的形式通过WiFi网络发送至数据集中器,数据集中器通过串口总线把数据传输给在远端监控中心的温度数据库^[6]。测温误差修正通过BP神经网络对红外测温仪采集到的设备温度进行修正;预警处理利用修正后的温度数据与设定的阈值进行判断,并将预警信息存储于预警数据库中;Labview远程监控平台显示监控画面和实时数据^[7-8]。该文设计的巡检机器人如图2所示。



图2 巡检机器人

Figure 2 Inspection robot

2 红外测温仪的原理及误差

2.1 红外测温的原理

变电站的稳定运行是电力系统正常工作的需要,电气设备温度过高是引起变电站事故的主要原因之一^[9],因此,准确测量电气设备的温度来判断其是否异常是十分重要。精确测量电气设备的温度是获取正确预警信息的前提,因此需要对测温结果进行进一步的修正。根据红外测温原理,计算被测目标表面真实温度^[10],即

$$T_u = \left\{ \frac{1}{\epsilon} \left[\frac{1}{\tau_a} T_r^n - (1 - \alpha) T_0^n - \frac{\epsilon_a}{\tau_a} T_a^n \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

设变电站设备为灰体,则 $\epsilon = \alpha$, 大气发射率 $\epsilon_a = 1 - \tau_a$ 。且变电站中测温仪器和被测目标距离地面都在十几米以内,因此可以认为大气温度等于环境温度^[9],即 $T_a = T_0$ 。式(1)变为

$$T_u = \left\{ \frac{1}{\epsilon} \left[\frac{1}{\tau_a} T_r^n + \left(\epsilon - \frac{1}{\tau_a} \right) T_0^n \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

式(1)、(2)中 T_u 为真实温度; T_0 为环境温度; T_a 为大气温度; T_r 为测量温度; ϵ 为表面发射率; α 为表面对环境辐射的吸收率; ϵ_a 为大气发射率; τ_a 为大气透射率; n 为红外波段对应的参数。

2.2 红外测温的误差分析

1)发射率 ϵ :发射率 ϵ 是指在相同温度及条件下,实际辐射体与黑体的辐射度的比值,是一个在 0 和 1 之间变化的数值。目标发射率 ϵ 通过远程视频监控辨识电气设备类型,从数据库中导入,减小误差。

2)参数 n :红外线的波长对大气透射率有一定影响,从而导致对测温结果的影响。变电站测量的电气设备温度不超过 350 °C,而 0~350 °C 的温度区间对应的红外线波长正好在 8~13 μm 的范围内^[11]。因此红外波段采用 8~13 μm ,此时式(2)中的 n 取 4。

由图 3 可以看出:红外波段 8~13 μm ,透射率基本不变,因而波长对透射率的影响忽略不计。

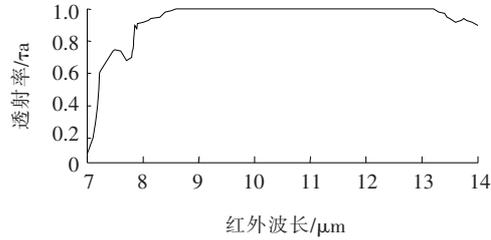


图 3 不同红外波长的大气透射率

Figure 3 Atmospheric transmittance at different infrared wavelengths

3)测量距离:通常可以从两方面因素认识测量距离对测温精度的影响。① 当距离增加时,大气透射率 τ_a 减小而导致的测温误差;② 当距离增加时,红外测温仪的视场角的视场面积也随之增大,被测物体不能充满视场时,输出数据减少,导致误差。

3 测温误差的修正

如前所述,红外测温受发射率 ϵ 、参数 n 、测量距离的影响会有一些的误差。该文通过 BP 神经网络对误差进行校正。首先,通过红外测温仪获取设备的温度作为初始值,然后建立 BP 神经网络模型进行初始值误差的预测,最后用输出的误差预测结果修正初始值,得到最终的设备温度。测温误差校正模型的结构示意图如图 4 所示^[12]。

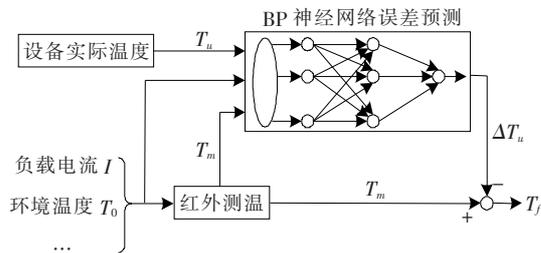


图 4 测温误差校正模型

Figure 4 Temperature error correction model

校正模型结构主要由红外测温 and BP 神经网络误差预测模型两部分组成。BP 神经网络的输入是红外测温仪测得的电气设备温度 T_m ,还包括影响电气设备温度的主要因素,如负载电流 I 和环境温度 T_0 。BP 神经网络的目标输出是红外测温的预测误差 ΔT_u ,是初始值 T_m 和实测值 T_u 的差值,预测输出误差 ΔT_u 来修正初始值,得到最终的设备温度 T_f ,具体为

$$\Delta T_u = T_m - T_u \quad (3)$$

$$T_f = T_m - \Delta T_u \quad (4)$$

通过红外测温仪测得的电气设备温度存在明显的温度误差。由于重复测量可以减少随机误差,采用BP神经网络对系统误差进行修正是合理的。电气设备温度的主要影响因素如负载电流和环境温度,可以从变电站监测获取作为BP神经网络的输入。电气设备温度是随负载电流和环境温度变化的时间序列,必须考虑时间滞后变量 $n\Delta t$,在平衡预测精度和计算量前提下, n 选取2比较合理。因此,测温误差校正模型预测某一时刻 $k\Delta t$ 的测温误差时,需要考虑 $(k-1)\Delta t$ 和 $(k-2)\Delta t$ 时刻的实际值。因此,BP神经网络的输入为 $I(n), I(n-1), I(n-2), T_0(n), T_0(n-1), T_0(n-2), T_m(n), T_u(n-1), T_u(n-2)$,目标输出为 ΔT_u 。对样本数据进行归一化操作,计算为

$$x_i' = (x_i - x_{\min}) / (x_i - x_{\max}) \quad (5)$$

式中 x_{\max}, x_{\min} 分别为各输入变量的极大、极小值, x_i' 是归一化处理后的样本数据。

4 预警处理

温度是变电站电气设备是否正常运行的重要指标,设计预警模块可以及早发现存在设备的潜在异常,引起工作人员注意,以便提早采取措施,避免或减轻故障带来的危害。一般的预警方式采用设定固定的阈值,通过实测值与阈值的比较达到预警效果。采取单一的预警方式可能会存在漏报的隐患,系统采用绝对测温预警和相对温差预警相结合,有效提高预警的准确性。

4.1 绝对测温预警

绝对测温预警,即实测温度值(修正后)与设定阈值比较进行预警。温度本身受诸多因素影响,具有动态变化的特征,阈值采用传统的固定阈值会因为季节或昼夜温度的变化,出现漏报或误报的情况,因而需要采用浮动的阈值进行判断。该系统采用与环境温度值线性相关的函数来整定阈值。此外,若环境温度过高,超过一定的数值,设备阈值不能再随环境温度值的升高而继续增大,否则即使超过设备的温度允许范围也不会预警^[13]。系统根据设备温度的高低来判断其严重程度,设置低级、中级、高级

3种程度的预警。根据分析,可以得到浮动阈值整定模型:

当 $T_0 + \eta_1 \leq T_{BM}$;

$$\begin{cases} T_{\min}^* = T_0 + \eta_1 \\ T_{\text{mid}}^* = T_0 + \eta_d \\ T_{\max}^* = T_0 + \eta_x \end{cases} \quad (6)$$

当 $T_0 + \eta_1 > T_{BM}$;

$$\begin{cases} T_{\min}^* = T_{BM} + \eta_1 \\ T_{\text{mid}}^* = T_{BM} + \eta_d \\ T_{\max}^* = T_{BM} + \eta_x \end{cases} \quad (7)$$

式(6)、(7)中 T_0 为环境温度; T_{BM} 为设备最高允许的温度; $T_{\min}^*, T_{\text{mid}}^*, T_{\max}^*$ 分别是设备的低级、中级、高级阈值; η_1, η_d, η_x 分别是设备的低级、中级、高级裕度参数,且在起初没有数据时一般分别取5、10、15℃。

4.2 相对温差预警

相对温差预警,通过与类型相同的电气设备正常运行时的温度或该设备正常运行的历史温度作比较,来判断设备的温度是否异常。其数学表达式为

$$\delta_t = \frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau_1} \times 100\% = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0} \times 100\% \quad (8)$$

式中 τ_1, t_1 分别为电气设备发热点的温升和温度; τ_2, t_2 分别是电气设备正常运行时的温升和温度; t_0 为设备所处的环境温度。 δ_t 超过规定的范围会显示预警。

5 实例分析与现场应用

5.1 实例分析

基于移动式红外测温的变电站设备温度预警系统在浙江省某变电站成功运行。巡检机器人在日常巡视时,对变电站重要设备和容易产生热故障缺陷的设备进行测温。该系统运行2个月,每次巡视都记录、存储温度、电流等相关数据。取秋山变电站“10 kV 舞阳 265 线出线电缆头”的温度数据进行对比分析,修正前后的误差对比如图5所示。

为了验证系统设计的合理性和可靠性,这里使用秋山变电站“110 kV 高压开关柜触头”在变电站运行期间的数据进行检验。使用历史数据库中的温度数据作图,为了获得更多的预警次数,固定阈值得取小一些, T_{BM} 取40.5℃, η_1 取3.2℃, η_d 取6.8℃, η_x 取10.3℃。动态曲线如图6所示。

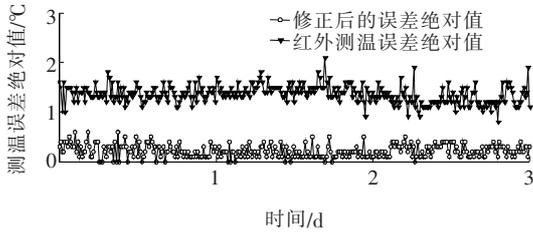


图 5 测温误差对比

Figure 5 Corrected before and after error comparison

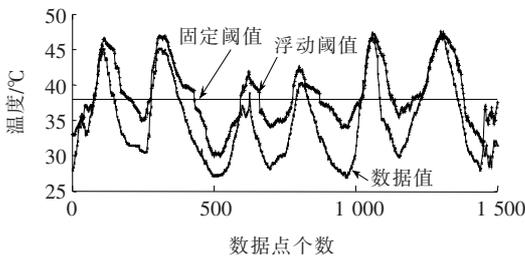


图 6 浮动阈值与固定阈值对比

Figure 6 Contrast between dynamic and static benchmarks

由图 6 可以看出:当环境温度较低时,固定阈值无法对设备温度过高进行预警,因此导致漏报;当环境温度较高时,固定阈值对所有情况进行预警,导致误报。采用浮动阈值进行预警,根据环境温度的动态变化,准确地判断设备是否出现异常,相比采用固定阈值方式能达到更加准确的预警效果。

该系统已经投入运行数月,经查询统计获知秋山变电站“10 kV 高压开关柜触头”在运行期间 2 种预警方式的次数。统计结果如表 1 所示。

表 1 2 种预警方式异常次数统计

Table 1 Abnormity times of two kinds of early warning

预警方式	等级	次数
相对温差预警	过高	4
	低级	2
绝对测温预警	中级	1
	高级	0

5.2 现场应用

基于移动式红外测温的变电站设备温度预警系统已在德清 35kV 配电站内投入试运行,该变电站运维人员能够在远端监控室使用电脑登陆固定 IP 地址的应用主页,通过工号进行身份登录,选择当前进行巡视工作的变电站,远程控制该站点内的巡检机器人,巡检机器人采集到的数据通过 WiFi 通讯传输到数据集中器,并存储到数据库中。具有服务器访问权限的工作人员也可以通过 MySQL Work-

Bench 等软件经过身份认证直接访问数据库内容并作维护。系统的远程巡视操作界面如图 7 所示。

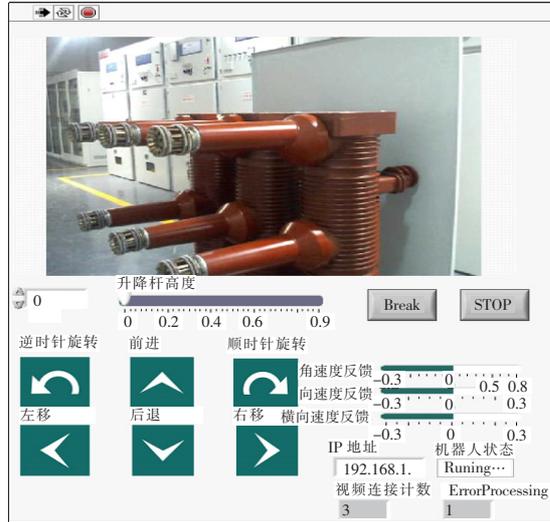


图 7 远程巡视操作界面

Figure 7 Remote patrol operation interface

6 结语

1)笔者研究的移动式红外测温预警系统以变电站巡检机器人为移动平台,分析红外测温的影响因素,并通过 BP 神经网络对误差进行修正,精度大大提高。

2)利用设备测温数据进行设备状态监测,以绝对测温预警和相对温差预警方式相结合,从而达到精确预警的目的。

3)移动式红外测温与浮动阈值相结合的创新性系统在变电站现场得到成功运行,促进了智能变电站的无人值守化,具有一定的工程意义和经济效益。

参考文献:

[1] 李小博,黄新波,陈绍英,等. 基于 ZigBee 网络的智能变电站设温度综合监测系统[J]. 高压电器,2011,47(8): 18-21.
LI Xiaobo, HUANG Xinbo, CHEN Shaoying, et al. Zig-Bee network-based intelligent substation temperature monitoring system[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47 (8): 18-21.

[2] 王方,岳艳杰,邱道尹,等. 基于红外技术的变电站温度监控[J]. 电网与清洁能源,2011,27(5):58-62.
WANG Fang, YUE Yanjie, QIU Daoyin, et al. Temperature monitoring of substations based on infrared

- technology[J]. *Power System and Clean Energy*, 2011, 27(5): 58-62.
- [3] 时斌. 光纤传感器在高压设备在线测温系统中的应用[J]. *高电压技术*, 2007, 33(8): 169-173.
- SHI Bin. HV switchgear temperature on-line monitoring system with distributed optical fiber sensor[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(8): 169-173.
- [4] 蔡骥然, 郑永康, 周振宇, 等. 智能变电站二次设备状态监测研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(6): 148-154.
- CAI Jiran, ZHENG Yongkang, ZHOU Zhenyu, et al. A survey of research on secondary device condition monitoring in smart substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(6): 148-154.
- [5] 韩伟, 姜帅, 马伟东, 等. 基于短地址关联数据标识的智能变电站虚回路可视化技术研究及应用[J]. *电力科学与技术学报*, 2018, 33(4): 95-101.
- HAN Wei, JIANG Shuai, MA Weidong, et al. Research and application of virtual circuit visualization technology in smart substation based on the short address associated data identification[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2018, 33(4): 95-101.
- [6] 翟瑞聪, 高雅. 电力设备远程监测诊断中心系统遥视信息联动应用研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(8): 150-154.
- ZHAI Ruicong, GAO Ya. Research on application of remote video information linkage of the power equipment monitoring and diagnosis center system[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(8): 150-154.
- [7] 施金晓, 邵能灵, 徐新星, 等. 变电站远程机器人巡视系统研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2017, 32(1): 23-28.
- SHI Jinxiao, TAI Nengling, XU Xinxing, et al. Research on substation remote inspection system with robots[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2017, 32(1): 23-28.
- [8] 罗磊, 臧少华, 邵能灵. 变电站远程巡视系统的无线通信技术[J]. *电力科学与技术学报*, 2014, 29(3): 92-96.
- LUO Lei, ZANG Shaohua, TAI Nengling. Research on wireless communication technology of substation remote inspection[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2014, 29(3): 92-96.
- [9] 潘岐泽, 杨芳, 杨志. 12 kV 高压开关柜受潮凝露机理及防治关键技术探讨[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(5): 160-172.
- PAN Qize, YANG Fang, YANG Zhi. Discussion on mechanism of the dampness and dewing inside 12 kV high-voltage switchgear and its key control techniques[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(5): 160-172.
- [10] 杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析[J]. *红外技术*, 1999, 21(4): 20-24.
- YANG Li. Calculation and error analysis of temperature measurement using thermal imager[J]. *Infrared Technology*, 1999, 21(4): 20-24.
- [11] 毛文奇, 王舶仲, 蒋毅舟, 等. 高压隔离开关分合闸位置监测技术的研究综述及展望[J]. *智慧电力*, 2019, 47(8): 112-119.
- MAO Wenqi, WANG Bozhong, JIANG Yizhou, et al. Summary and prospect of breaking-closing position monitoring method for high voltage disconnecter[J]. *Smart Power*, 2019, 47(8): 112-119.
- [12] 刘北阳, 李志兵, 刘春, 等. 基于 BP 神经网络的弧触头烧蚀状态评估方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2019, 34(1): 74-79.
- LIU Beiyang, LI Zhibing, LIU Chun, et al. Erosion status evaluation of arc contact in a HV SF₆ breaker based on BP neural networks[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2019, 34(1): 74-79.
- [13] 孟晓, 胡炎, 邵能灵, 等. 变电站无线测温告警算法[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(5): 81-86.
- MENG Xiao, HU Yan, TAI Nengling, et al. Algorithm of wireless temperature measurement and alarm in substations[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(5): 81-86.