

基于 AR 技术的换流变压器阀侧套管 局部高温故障多点红外预警方法

邵永浩[†], 刘佳敏, 罗文盛

(国网宁夏超高压公司, 宁夏 银川 750000)

摘 要:为保证换流变压器安全与稳定运行,及时发现套管内部由于放电引起的局部过热问题,研究了基于 AR 技术的换流变压器阀侧套管局部高温故障多点红外预警方法。考虑换流变压器阀侧套管的材料性能,以设备在实际工作状态下的正常温度变化为条件,根据套管的电流冲击变化形式,描述其温度场分布类型。基于 AR 技术构建三维虚拟空间,在摄像机三维跟踪过程中,转换现实场景中的被测物体信息,注册套管实时温度网。利用红外测距生成换流变压器阀侧套管温度直方图,以融合特征算法增强温度特征,对局部高温目标点定位,预警故障的具体位置。实验结果表明:本文方法能够在 AR 技术下对换流变压器阀侧套管进行场景转换,并在局部空间内标记出高温故障点位置,通过红外温度数据完成及时预警,具有应用效果。

关键词: 预警方法; AR 技术; 换流变压器阀侧套管; 局部高温; 多点故障

中图分类号: TP277

文献标识码: A

Multi-point Infrared Early Warning Method for Local High Temperature Fault of Valve Side Bushing of Converter Transformer Based on AR Technology

SHAO Yonghao[†], LIU Jiamin, LUO Wensheng

(State Grid Ningxia Ultrahigh Voltage Company, Yinchuan, Ningxia 750000, China)

Abstract: In order to ensure the safe and stable operation of the converter transformer and find out the local overheating caused by the discharge in the bushing in time, a multi-point infrared early warning method for the local high temperature fault of the bushing at the valve side of the converter transformer based on AR technology is studied. Considering the material properties of the bushing at the valve side of the converter transformer, taking the normal temperature change of the equipment under the actual working state as the condition, the temperature field distribution type of the bushing is described according to the current impact change form of the bushing. The virtual space is constructed based on AR technology. During the three-dimensional tracking process of the camera, the information of the measured object in the real scene is converted, and the casing real-time temperature network is registered. The temperature histogram of the bushing at the valve side of the converter transformer is generated by infrared ranging, and the temperature feature is enhanced by the fusion feature algorithm to locate the local high-temperature target point and warn the specific location of the fault. The experimental results show that the method in this paper can perform scene conversion on the valve side bushing of converter transformer under AR technology, mark the location of high-temperature fault point in local space, and complete timely warning through infrared temperature data, with application effect.

Key words: early warning method; AR technology; converter transformer valve side sleeve; local high temperature; multi-point fault

为满足人们对能源的巨大需求,实现国内能源经济的合理分配,现阶段在我国各城镇内开展了特高压电网建设。换流变压器阀侧套管是高压建设的关键设备之一,在运行过程中承担了高压电和强大电流,需要对其进行严格监控,实时监控设备的工作状态。但随着应用过程中外界环境与材料自身等因素的影响,套管内会发生不同程度的放电,容易造成局部过热等问题,需要对其引起的故障进行实时监测和预警。现有故障预警方法中,文献[1]以 CNN 技术为标准,考虑了换流器的电流特性,在其内部安置了温度传感器,但由于工作环境中存在噪声影响,使得故障区域的温度表征测量不明显。文献[2]以 PIC 单片机实现故障预警,通过单工通信方式,增加了多类型射频通道,对套管局部温度数据进行采集和归类,但风险区间隶属度划分不明确,这在预警过程中会造成定位精度低以及不及时等问题。

AR 技术又称增强现实技术,从 VR 设备概念原型入手,历经长年累月的研究,由华盛顿大学的博士开发了第一套 AR 系统工具包。随着 AR 应用的快速发展,其在建筑和工业以及教育等多个领域发挥着重要的影响作用。该技术将任务可视化和流程化融为一体,可以对任务流程进行指导,在一定程度上提高了工作人员的工作效率。本文以此为基础研究基于 AR 技术的故障预警方法,为及时发现并维护设备提供理论要求。

1 描述换流变压器阀侧套管温度场分布类型

为能够及时对故障进行分析和定位,需要对其温度场的分布类型进行划分,分类出不同故障类型对应的特征。考虑换流变压器阀侧套管的材料参数,对其局部的温度场变化进行求解,按照轴对称形式,公式如下:

$$\eta^2 = \frac{1}{\partial} \frac{\beta}{\beta \partial} \left(\partial \frac{\beta \phi}{\beta \partial} \right) + \frac{\beta^2 \phi}{\beta q^2} \quad (1)$$

式中:套管接入电场中的拉普拉斯算子为 η 。材料的电导率为 ∂ 。温度场的点位梯度为 β 。传导电流的介电参数为 q 。套管中材料的线性参数为 ϕ 。考虑温度的线性变化效应,以散度定理为基础,对套管的材料介质进行定义,公式为:

$$\begin{cases} \partial \eta \cdot \eta \phi + \delta \frac{\beta \eta \cdot \eta \phi}{\beta w} = 0 \\ (\partial + \delta \frac{\beta}{\beta w}) \eta \cdot \eta \phi = 0 \\ (\partial + \delta \frac{\beta}{\beta w}) \eta^2 \phi = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:相对介电常数为 δ 。温度场变化中位移量为 w 。当该参数随着温度场变化时,定义其为线性材料。则边界条件为:

$$\begin{cases} e_{r1} = e_{r2} \\ t_{1u} + \frac{\beta i_{1u}}{\beta w} = t_{2u} + \frac{\beta i_{2u}}{\beta w} \\ i_{1u} - i_{2u} = y_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中:在静电场强度中法向分量 r 的边界条件为 e_{r1} 和 e_{r2} 。位移通量 u 中,温度变化条件为 t_{1u} 和 t_{2u} 。在不同传导电流密度下的温度场边界条件为 i_{1u} 和 i_{2u} 。介质中的自由密度为 y_1 。已知实际工作场中的温度变化情况与换流变阀侧套管的自身承载电流有关,因此在运行中产生过热的问题十分正常^[3]。常态化运行的电流为基础,展示套管中导电管截面,如图 1 所示。

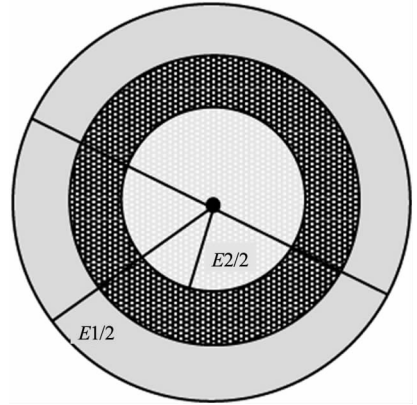


图 1 套管中导电管截面

根据图 1 中内容,套管升温过程中会受到多种因素影响,以电流为例,套管的外径和内径分别为 E_1 和 E_2 ^[4]。在温度为 W 时的材料电阻率为 λ_w ,单位为 $\mu\Omega/\text{cm}$ 。则:

$$R_{\text{test-ac}} = \sqrt{\sum_T \left(R_T^2 \times \frac{Y_T}{Y_1} \right)} \quad (4)$$

式中:等效基波电流为 $R_{\text{test-ac}}$ 。谐波变化次数为 T 。则第 T 次谐波的电流为 R_T 。在第 T 次谐波的套管交流电阻为 Y_T 。初始交流电阻为 Y_1 。将其代入值套管外径,则存在如下关系:

$$R_{\text{test-ac}} = \sqrt{R_1^2 \sum_T \left(\frac{R_T^2}{R_1^2} \times \frac{\sqrt{T \times (E_1 - U_1)}}{(E_1 - U_T)} \right)} \quad (5)$$

式中:在第 T 次谐波的套管经过电流时,能够渗入的导体深度为 U_T 。初始导入深度为 U_1 。初始谐波电流为 R_1 。在不同的谐波转换中,套管受到的电流冲击会产生温度场变化,为进一步对产生高温的部位进行跟踪,利用 AR 技术建立三维温

度网。

2 基于 AR 技术的三维虚拟空间温度网

AR 技术将虚拟环境通过三维跟踪注册的方式,注入现实场景,以此来完成多种方式的图像实时交换^[5]。以摄像机三维注册技术,通过摄影机获取到的真实世界,从二维向三维矩阵变换,重新构建一个以摄影机为原点的虚拟空间,如图 2 所示。

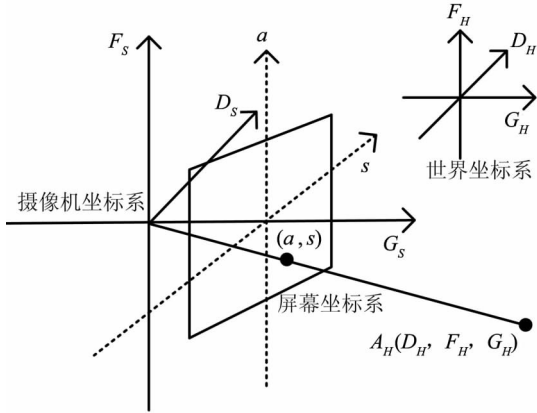


图 2 三维虚拟空间

如图 2 所示,在以摄像机为原点的虚拟空间中,含有摄像机坐标系,其存在的坐标点设置为 $A_s(D_s, F_s, G_s)$ 。将实物原点所处的现实世界称作世界坐标,其坐标点表示为 $A_H(D_H, F_H, G_H)$ ^[6]。以摄像机为原点的虚拟三维空间,能够确定虚拟模型在现实世界中所处的具体位置。在平面图像所处的坐标系中,利用成像平面和真实世界,与摄像机的位置关系,建立不同坐标系的转换矩阵。变换公式为:

$$\begin{bmatrix} D_s \\ F_s \\ G_s \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} D_H \\ F_H \\ G_H \end{bmatrix} + \mathbf{K} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_H \\ F_H \\ G_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_D \\ K_F \\ K_G \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:正交变换的矩阵为 $\mathbf{J}$ 。平移变换的矩阵为 $\mathbf{K}$,经过平移后的坐标点表示为 (K_D, K_F, K_G) 。设置成像平面中的点为 (a, s) ,将其导入世界坐标 (D, F, G) 中,则变换为:

$$\begin{bmatrix} a \\ s \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_D & 0 & f_D \\ 0 & f_F & f_F \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & K_D \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & K_F \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & K_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_H \\ F_H \\ G_H \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:深度值为 d ,表示真实点在摄像机坐标系中,在 G 方向上的数值^[7]。等式右侧矩阵,分别为相机内、外参数矩阵、世界坐标系矩阵。根据 AR 技术对上述关系进行转换,完成换流变压器阀侧套管在三维空间中的真实数据信息注册。换流变压器阀侧套管在长期运行过程中,受电气和热力等联合作用影响,容易造成多种缺陷问题,即引发换流站直流闭锁等故障,因此在获取套管温度场类型后,根据 AR 技术完成实时温度网的建立,以红外测距方法定位故障目标,例如,对于油浸式套管、电流互感器等综合致热型设备,每隔两小时拍摄一次,当缺陷由两种或两种以上因素引起时,应根据运行电流、发热部位和性质进行综合分析判断,不用重复到现场,便能获得被测目标的红外成像温度数据,即形成对测温数据的诊断,对于因磁场和漏磁引起的过热,可依据电流致热型设备的判据,匹配套管温度场类型,并按时或定时发送预警信息。

3 红外定位目标点与预警故障位置

3.1 红外定位目标点特征分量的估计

红外成像是利用物体的自身辐射,在差异中通过长波获取细节,转换为可见光图像^[8]。基本上会采用 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 以及 $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 两组波段,而辐射亮度的分布,直接由被测物体的温度和反射率决定,因此在对换流变压器阀侧套管温度监测和预警时,可以通过红外成像进行温度差反应。热成像产生过程如图 3 所示。

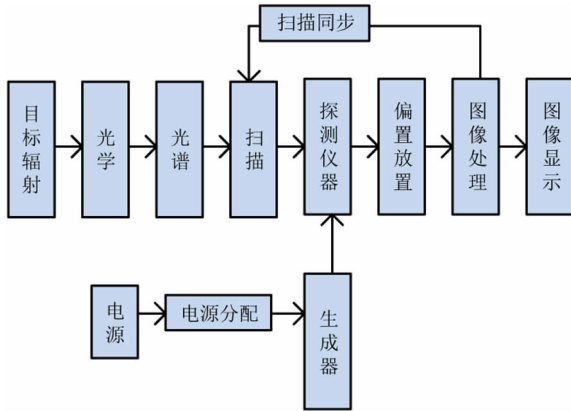


图 3 热成像产生过程

图 3 所示红外热成像的过程中,能够清楚地看出,被测目标和背景,均在红外辐射的基础上,在大气和光学以及电气等方式下,进行图像和视频的转换,以此获取被测物体的红外图像。

受外界环境影响,在随机干扰的作用下,在产

生的图像中会产生热噪声以及光子噪声等,需要对其进行均匀去噪处理。按照一维直方图的像素灰度分布情况,对生成的灰度进行分析,当数字图像为 $z(x, c)$ 时,则图像灰度为 $v_0, v_1, \dots, v_n$, 表示为:

$$\xi(v_n) = \frac{Z(v_n)}{X} \quad (8)$$

式中:密度函数为 $\xi(v_n)$ 。 v_n 灰度级中的像素数为 $Z(v_n)$, 其中 $n = 0, 1, 2, \dots$ 。总像素数为 X [9]。由于 v_n 取离散值,则统计方法还可以按照灰度级坐标形式表示。则:

$$b(m) = \lim_{m \rightarrow 0} \frac{g(m) - g(m + \Delta m)}{\Delta} \quad (9)$$

式中:离散函数为 $b(m)$ 。图像的阈值面积为 $g(m)$ 。函数固定值为 Δm , 基本取 1。对于离散后的监测图像数据,可以将其设置为弱小目标,以目标的灰度分布为定位特征,对其特征进行融合处理,采用高通模板进行卷积处理,做出特征分量的估计,如下:

$$k(h, j) - \bar{k}(h, j) = k_0(h, j) + l(h, j) \quad (10)$$

式中:原始图像为 $k(h, j)$ 。图像中的低频分量为 $\bar{k}(h, j)$ 。被检测的温度目标分量为 $k_0(h, j)$ 。高频分量为 $l(h, j)$ 。其中高频分量中含有噪声和背景边缘等干扰信息。

3.2 故障位置 AR 增强

在卷积模板中以矩阵 C 来表示,换流变压器阀侧套管,高温条件下的脉冲响应函数 [10]。以 C_1 和 C_2 两组空域形式为模板,存在:

$$C_1 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 25 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 5 & -1 & -1 \\ -1 & 5 & 5 & 5 & -1 \\ -1 & -1 & 5 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据空域模块的设定,其中 C_1 的像素权值最大,可以轻松通过,而周围权值为 -1,不会通过。可以对噪声点进行孤立,使被测目标能够轻易地完成分离,则当噪声形成一定面积时,不会被容许通过,能够对被检测的目标减少抑制影响。 C_2 中较高权值分散为十字,虽然权值较为分散,可以使小目标发生膨胀,即被测目标成像灰度均匀化,增强了

温度信息在图像中的占有比例。

由此所产生的图像会具有多个特点,即被测物体的温度分布是一个灰度图像,没有立体视觉感官,需要以 AR 技术进行增强,即假设摄像机的标定工作已经完成,投影矩阵为

$$Z_d \begin{bmatrix} u_l \\ v_l \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{l1} & m_{l2} & m_{l3} & m_{l4} \\ m_{l5} & m_{l6} & m_{l7} & m_{l8} \\ m_{l9} & m_{l10} & m_{l11} & m_{l12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

理想情况下,两相机光轴处于同一高度,用视差表示点 P 在摄像机坐标系下的三维坐标为:

$$\begin{cases} x_c = \frac{B \cdot X_{\text{left}}}{\text{Disparity}} \\ y_c = \frac{B \cdot Y}{\text{Disparity}} \\ z_c = \frac{B \cdot f}{\text{Disparity}} \end{cases} \quad (14)$$

由此可知,若要确定空间某一点的三维坐标,只需找到该点投影在左相机像面上的点以及右摄像机上与之对应的点,通过两组空域模板的设定,将成像后的信息进行增强处理,完成局部高温的特征分析。在发生超过预定值时,发出预警信息,完成故障检测。

至此通过 AR 技术和红外成像方式,对换流变压器阀侧套管的温度进行监测,完成局部高温故障多点预警方法设计。

4 实验测试分析

在 AR 技术的应用下完成了故障点红外预警方法设计。为验证新方法具有实际应用效果,采用对比测试方法进行论证。整个测试分为两个阶段:第一阶段,对本文方法的跟踪效果进行分析;第二阶段,引用 CNN 预警和单片机预警两种传统方法作为对照,在线监测选定的某输电系统的换流变压器阀侧套管,对其端口温度进行实时跟踪监测,把握其温度状况实时信息,当高出温度临界值时,发出预警信息。通过上述两阶段验证不同方法对高温故障预警的准确性和及时性。

4.1 目标点温度跟踪效果

为了获取换流变压器阀侧套管中某一个部位的温度,需要对多个目标部分进行温度获取,利用本文方法在选定的输电系统中随机选择换流变压器阀侧套管的局部位置,AR 技术根据温度场分布

类型描述结果跟踪注册实时温度网,生成三维场景模型。利用 AR 技术在套管局部监测位置中划定出 5 个十字交叉点,认定其选择的位置为最高温度所处目标点。转换后左上角出现“CV↑=××.×”字样,其中“C”表示选择的区域,“V”表示区域的目标点序号,“↑”表示在查找过程中区域内最高温度的位置,“××.×”为目标点的测试温度。并在图像中标记设置 5 个预警节点,如下图 4 所示。



图 4 局部目标多点红外场景

针对监控场景中的 5 个节点进行高温故障多点红外监测,跟踪其中存在高温故障的节点位置,结果如图 5 所示。

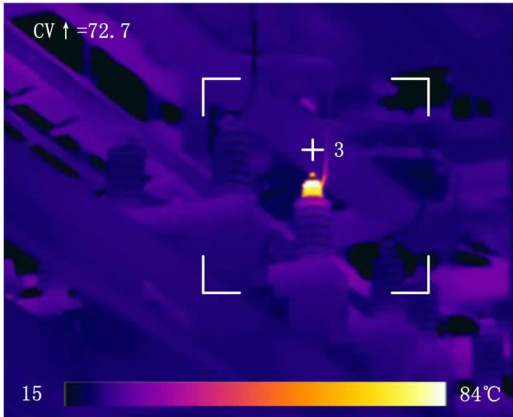


图 5 局部测温多点跟踪结果

从图 5 中可以清楚地看到,在该区域内存在高温目标点,确定了在换流变压器阀侧套管局部,发生了高温故障问题,由此验证了本文方法能够完成高温故障跟踪,为故障警提供数据来源,具有应用效果。

4.2 区域高温预警测试

只有满足最高温度的点位跟踪,才能根据得到的信息,对比换流变压器阀侧套管是否发成高温故

障,以此发出预警。而局部测温主要是分析换流变压器阀侧套管中,在特定情况下,整体温度和最高温度的对立性能够在发生故障时显示出最高温度所在位置,当发现后进行高温报警。在选择的输电系统中,使用本文方法与两种传统方法以相同条件对套管的局部位置温度进行预警。按照输电的频率变化规律,在介质损耗对比中,展示套管端口处的温度变化,如表 1 所示。

表 1 换流变压器阀侧套管端口温度数据样本		
频率	介质损耗因数	温度/℃
5	0.12	20
50	0.24	25
100	0.35	30
200	0.45	50
500	0.59	75
800	0.63	95
1200	0.75	135

根据表 1 中内容,换流变压器阀侧套管端口处的温度会随着输电频率的增加,不断加法介质损耗因数,当损耗因数超过 0.45 时,端口温度会急剧增加,数值超过 50℃,则可设定其发生了故障问题。以数据样本为测试数据,将其上传至 MATLAB 测试平台,AR 多点红外预警效果图如图 6 所示。

图 6 中,通过摄像机标定套管结构后,二次增强故障位置高温点,AR 显示多点红外预警结果。

高频分量中含有噪声和背景边缘等干扰信息,为了区别被检测的温度目标分量与高频分量,但是只有高频分量才会更为全面地展现温度信息,由此,需要研究多个温度目标分量中的高频分量识别结果,分析不同方法的识别准确率,分析结果如图 7 所示。

图 7 中,本文方法的识别准确率在 99% 以上,说明其可以辅助定位区域内最高温度的位置,保证红外检测结果的完整性和逻辑性。

分别连接三组故障预警方法,验证三种方法是否可以在端口温度到达临界值时发出预警信号,结果见图 8。

根据图 8 显示的测试结果可知,仅有本文预警方法在端口温度到达临界值(50℃)时,完成了瞬时标记进行故障预警;CNN 预警方法和单片机预警方法分别在介质损耗因数为 0.63 和 0.75 时才实现了预警,忽略了初始阶段故障产生的高温,只在极高温情况才进行预警,充分说明了传统方法预警误差较大,具有滞后性。

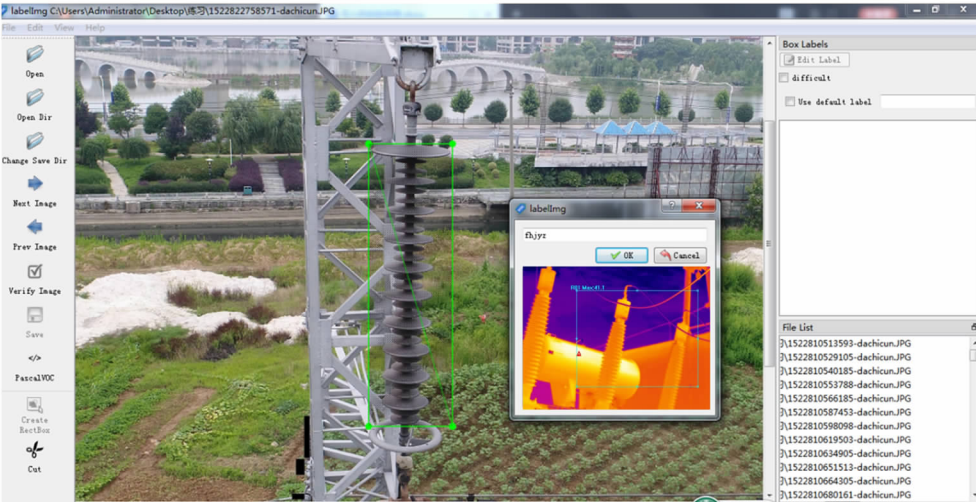


图 6 AR 多点红外预警效果

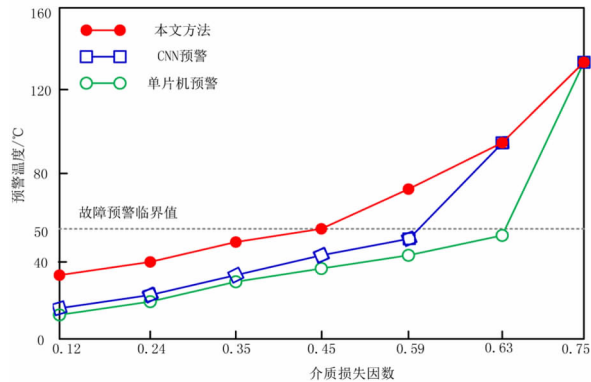


图 7 分析不同方法的识别准确率

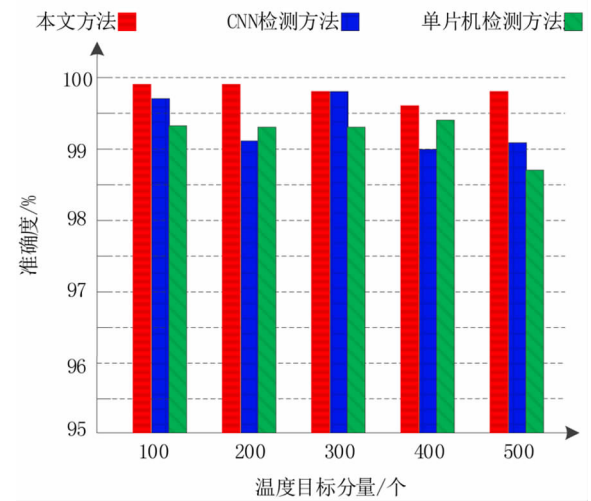


图 8 预警效果对比

5 结 论

换流变阀侧套管作为输电系统中的主要设备,其运行的稳定性会直接影响电力系统的安全,设计

了其局部高温的预警方法,并取得了一定效果。而 AR 技术和红外成像方式涉及多个领域,此次研究中仅考虑了一部分内容,在对换流变阀侧套管其他故障问题的监测中,没有进一步做出分析,存在不足。后续研究中会考虑多个方面,从不同成像条件和材质进行分析,对换流变阀侧套管可能会出现故障类型进行探讨,为故障预警提供实用性的方法支持。

参考文献

[1] 刘慧舟,胡瑾秋,张来斌,等.基于红外热成像与 CNN 的压裂装备故障精准识别及预警[J].中国石油大学学报(自然科学版),2021,45(1):158—166.

[2] 王慧.应用 PIC 单片机的航行触礁风险红外预警系统设计[J].舰船科学技术,2020,42(16):43—45.

[3] 盖海龙,盛祯,张海杰,等.特高压换流变压器阀侧套管 TA 故障分析及检修[J].山东电力技术,2019,46(9):76—80.

[4] 张施令,彭宗仁,宁鑫,等.±400 kV 换流变压器阀侧套管绝缘结构设计[J].电力自动化设备,2021,41(6):199—208.

[5] 曹豫岩,高仕军,詹耿,等.换流变阀侧套管防火墙洞口封堵抗冲击结构研究[J].建筑技术开发,2021,48(5):1—3.

[6] 王生杰,包正红,林万德,等.高海拔条件下换流变压器阀侧套管温升仿真研究[J].变压器,2021,58(2):47—51.

[7] 王宇,马成,彭博,等.天基红外预警卫星高精度协同目标跟踪方法[J].中国惯性技术学报,2022,30(2):257—263.

[8] 黄曦,吴鑫.基于天基红外预警系统的导弹中段弹道成像特征实时仿真[J].空天防御,2020,3(4):60—66.

[9] 谢伟锋,武嘉薇.换流变压器阀侧套管充气及压力检测装置的研制[J].宁夏电力,2019(2):51—53.

[10] 王晶晶.夜视红外激光社区视频异动监控预警系统设计[J].激光杂志,2020,41(5):144—148.