[变电站]

红外热成像技术在变电站的应用

文/顾玲玲　顾敏
国网上海市电力公司

相较传统预防性试验，将红外热成像技术用于变电站日常运维，能够在非接触、不停电的情况下完成站内设备状态检测，排除设备隐患，更安全、更便捷。阐述红外热成像技术的原理，介绍该技术在变电站的应用实例，并分析该技术在变电站应用中的优点与局限。

红外热成像技术在变电站的应用最早源于20世纪70年代初，随着红外热成像技术的成熟和快速发展，现作为一种电气设备带电检测手段已普遍用于变电站日常运维工作[1]。

变电站中70%的故障源于设备，而红外热成像技术能够在不停电、无接触的情况下观测设备运行情况，分析、识别和诊断电气设备存在的故障及隐患，提高对设备缺陷判断的预知性、准确性，进而指导设备检修[2]。将红外热成像技术用于变电站设备检测，能够为运维人员及时停电和制定消缺方案提供可靠依据，降低事故风险，实现预测性维护，减少维护成本和设备维修的成本，延长设备寿命，最大限度地提高维护效果和生产能力，有着极为重大的意义。

一般常采用绝对温度判别法、相对温度比较法和同类温度比较法对不同类设备发热缺陷性质进行诊断[3]。根据发热情况，设备发热缺陷可分为一般缺陷、严重缺陷和危急缺陷。其中危急缺陷需要立即申请停电处理，一般、严重缺陷主要以跟踪为主。通过对设备发热点进行跟踪，可鉴别设备缺陷发展情况。

红外热成像技术的原理

在自然界中，一切温度高于绝对零度的物体都在不停地向周围空间发出红外辐射能量。根据斯蒂芬玻尔兹曼定律（式1），物体的红外辐射功率与物体表面绝对温度的四次方成正比。因此，通过测量物体自身辐射的红外能量，便能测定它的表面温度。

$$P=\varepsilon\times\sigma\times T^4\left(W/\mathrm{m}^2\right) \tag{1}$$

如图1所示，红外热成像仪由光学系统、光学探测器、信号放大器、信号处理和显示器等部分组成。光学系统接收视场内目标的红外辐射能量，将其作用在光学探测器上转变为相应的电信号，该信号经过放大器和信号处理电路转变为被测目标的温度值，并将测温图谱结果反映在显示器上。

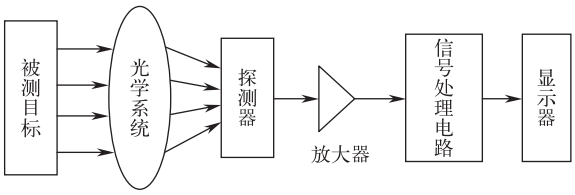


图1　红外成像仪测温原理图

红外热成像技术在变电站中的应用

1. 基于一二次设备发热的缺陷诊断

发热会降低设备绝缘，缩短设备寿命，严重情况下，甚至损毁设备发生事故。变电站一次设备发热根据原因主要可分为电压致热型、电流致热型和综合致热型。其中，电流致热型常见于设备接头和

线夹、闸刀刀口、断路器动静触头和套管柱头等部位，多是接头氧化腐蚀或接触不良导致。一般电流致热型热点表面温度高，相对温差大，较易识别。电压致热型则常见于电流互感器、电压互感器和绝缘子等设备本体发热，多是由于内部受潮老化、局放故障或介损增大导致。一般电压致热型是内部发热通过介质传导、对流引起表面温度升高，因此热点温升不明显，且易受到光照强度、环境温度和风力大小等因素影响，较难识别和分析判断。一次设备热点的缺陷性质通常采用绝对温度判别法和相对温度比较法两种方式，即通过设备本身绝对温度和与同间隔其他相设备之间的温差来判定缺陷情况。

变电站二次设备发热根据原因主要可分为两种：一种是流变、压变的二次回路接头；另一类是二次元器件，如继电器、模数转换模块等。第一种多因端子排接头连接松动导致，可与相邻设备对比，较易发现热点。第二种通常为元器件内部故障导致。由于不同元器件的功率不同，温度不一样。所以较难通过与相邻元件比较的方式判断热点是否异常。二次设备热点的缺陷性质通常采用历史比对法，即将当前温度与历史数据做对比。

文献[4]提出一种基于历史温度数据的直观分辨二次热点的方法：根据对二次回路多次测温的结果，绘制直方图，以高概率数据作为其运行正常值。在二次屏柜盘面图的基础上绘制二次设备温度分布图谱，并张贴在柜侧。通过颜色比照，能更直观、更快速地发现异常。

2. 充油设备的油位测量和内部缺陷探测

变压器、电抗器等充油设备有时会由于卡涩等原因出现假油位情况。通常情况，需由变电检修人员到现场，使用专用工具外接，利用连通器原理来确定油面位置。但这种方法通常需得两三个人员共同操作，在狭小空间内，绝缘杆较难施展竖举拉长，且油位所测高度也受限于绝缘杆的长度，极为不便。

鉴于油枕处的油和空气导热特性区别大，利用红外成像仪下充油设备油枕处的温度分布情况，即可获知油位大致位置，更便捷、更方便，也更利于第一时间判断性质，及时应对，避免事故。

另外，充油设备内部的故障有时也会造成异常发热，这时也可通过红外测温探测缺陷大致位置，从而判别缺陷原因。

2. GIS设备的SF_6检漏和内部发热点检测

GIS设备常见缺陷为漏气造成气室SF_6压力低，主要漏气原因常见于本体或封板存在裂纹，本体与封板间密封不严，发热导致绝缘老化密封失效[5]等。SF_6压力低会降低设备的绝缘强度、灭弧能力，影响设备安全运行，严重情况下甚至会造成击穿扩大事故。一般常用的检漏方法有肥皂气泡法、包扎法、卤素效应检漏法和热导检测器法等，但这些方法需专业人员到现场检测，用时长，所需器械复杂，不够快捷简便。而利用SF_6对红外辐射吸收能力比空气强，相同环境下温度有差别的特点，可利用红外热成像技术在无接触、不停电的情况下快速甄别定位设备的漏点，从而快速确定停电范围，制定消缺检修方案。

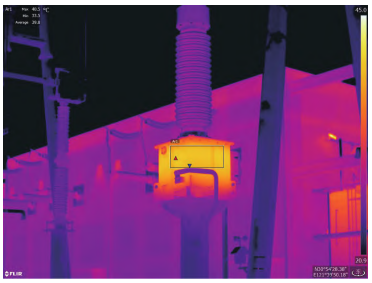
此外，红外热成像技术还可用于GIS设备内部发热点的检测[6]。GIS设备内部接头发热，具有危害程度高、隐蔽性强等特点，而利用红外热成像技术可发现内部接头过热，罐体环流引起的过热及套管引线过热等缺陷，有利于运维人员掌握设备运行情况。

红外热成像技术在变电站缺陷诊断中的应用

1. 红外测温发现压变电磁单元异常

某日，某220 kV变电站自动化后台报“220 kV第二套母差CSC-150A运行异常”，运维人员现场检查母差保护，发现液晶面板显示“II母差动电压开放；II母失灵电压开放”，对应故障录波仪启动，二母母线电压瞬时畸变导致$3U_0$越限告警。经按信号复归按钮，告警复归，后台信号复归，母线三相电压遥测值均正常。第二天，该站自动化后台又再次出现相同信号。

运维人员随之对二母母线压变进行检查，经检查压变外观无异常；经红外测温后，发现二母压变A相电磁单元有异常发热现象，A相40℃，B、C相30℃，相对温差33.3%。运维人员立即申请停电处理。经停电检查发现A相压变电磁单元内有浸水，或因内部浸水导致绝缘击穿。在更换A相压变电磁单元后，后台电压和温度恢复正常。二母压变电磁单元红外图谱如图2所示。



（a）A相

（b）B相

（c）C相

图2　二母压变电磁单元红外图谱

由该实例可见，红外热成像技术可辅助运维人员在非停电情况下检测到设备异常情况，并及时诊断缺陷，在缺陷造成事故前完成停电检修，确保电网安全稳定运行。

2. 红外测温发现穿墙套管末屏异常

某日，运维人员在对某站例行红外测温时发现该站1#主变压器110 kV穿墙套管红外测温C相末屏有异常发热现象，A相11.7 ℃、B相13.6 ℃、C相16.4 ℃。运维人员立即申请停电对C相穿墙套管进行检查。经解体分析发现，穿墙套管有明显劣化、污秽现象，末屏明显脏污，垫片中度变形引起与引线柱间的接触不良，破坏了末屏的密封结构。经初判，是因C相末屏内部积水导致C相末屏接地不良而产生较高的悬浮电压造成发热。后经对穿墙套管进行更换并喷涂防污闪涂料后恢复正常。

3. 红外测温发现线路电缆终端箱接地异常

某日，运维人员在对某站例行测温时，发现某220 kV回路电缆终端箱接地扁铁接头发热，温度高达357 ℃。运维人员立即联系电缆人员。后经判断接地线桩头螺栓未紧固而导致发热，经接触面清化处理并拧紧螺栓后，温度恢复正常。

该情况如不及时发现，可能造成运行电缆迫停，发生停电事故。

4. 红外测温发现35 kV GIS设备SF_6泄露

某日，某站主变压器35 kV间隔副母闸刀气室SF_6压力低报警，经补气后，压力恢复正常，报警信号复归。后经观察，该气室压力低报警信号频繁发出，补气频繁，平均补气间隔约7天。

运维人员随即利用SF_6气体检测热像仪对该问题气室间隔进行扫描观测，最终发现该间隔B相副母闸刀气室外封板上密封圈处出现SF_6气体典型特征烟雾，疑似漏点。后经解体发现或因外封板或密封圈间隙扩大造成。经调整调换，后期跟踪未发现漏气现象。

红外热成像技术在变电站应用中的优点与局限

红外热成像技术在变电站应用中的优点如下。

1）运维人员可在不停电的情况下远距离检测设备运行情况，这种非接触性检测一方面可以保障人身安全，另一方面也能减少设备停电，保障供电可靠性。

2）红外热成像技术快速便捷，单人即可操作，测温设备便携，方便人员进行多站大范围检测。

3）红外热成像检测结果当场可见，具象直观，虽没有电气试验的精确性，但能方便人员发现异常，快速定位缺陷大致位置，辅助检修，提高效率。

但是，红外热成像技术在变电站应用中也有局限性，主要体现在测温结果的精确性受以下因素影响较大。

1）环境因素。根据红外热成像技术的原理可知，红外测温的结果取决于红外成像仪吸收的红外辐射能量。受不同环境温度、湿度和风速影响，测得的结果准确性也不同。另外，阳光直射和反射、灯照等，也都会影响测温结果。因此一般建议在环境温度不低于0 ℃、相对湿度不大于85%、风速不

大于5 m/s的阴天或多云下进行测量，准确度更高。

2）人员因素。不同人员拍摄角度会有不同，人员拍摄的技术水平也参差不齐，量程的选择、与被测物直接的距离、测量焦距与方向的选择以及拍摄时仪器的平稳度都会影响到测温结果。

红外热成像技术的应用展望

目前，已有站点使用智能巡检机器人进行规定路径定时定点测量。后期将使用智能巡检机器人与站内数据网络对接，建立强大的特征图谱数据库[7]，通过在线分析功能将监控点数据与历史数据交叉比对，智能诊断并完成信息推送，以智能化推动红外热成像技术更好地服务生产。**EA**

（收稿日期：2024-02-02）

参考文献

[1] 带电设备红外诊断应用规范：DL/T 664-2016[S].

[2] 贾达菲，杨冬冬，高宏．红外热像技术在电力设备故障检测中的应用[J]．山西电力，2018(6)：30-33.

[3] 郑惠，张圣，吴显辉．基于红外检测技术的多判断方法融合的设备热状态诊断研究[J]．节能，2022(5)：44-46.

[4] 陈恺．红外检测技术在电力系统中的应用研究[D]．上海：上海交通大学，2018.

[5] 王彦强．GIS设备发热故障与预防措施分析[J]．电子技术，2022(9)：298-299.

[6] GIS设备红外热像检测现场应用导则：T/CES 113-2022[S].

[7] 王杨洋，杨京雷，付高阳，等．基于人工智能的红外热成像监控系统设计[J]．电脑知识与技术，2023(4)：1-3.