红外诊断技术在电力系统中的应用

李新星　,何亮　,林选

临汾供电公司，山西 临汾　041000

摘要　本文从重要性、基本原理、影响因素、诊断流程等多个方面，结合实例分析，阐述、探讨了红外诊断技术在电力系统中的应用及其直观性、复杂性。

关键词：红外诊断；应用；直观性；复杂性

The Specific Application of Infrared Diagnosing Technology in Electric Power System

Li Xinxing　He Liang　Lin Xuan

Linfen Electric Power Corporation, Linfen，Shanxi　041000

Abstract　By case analysis, the paper discusses the specific application of infrared diagnosing technology in electric power system and its visual and complexity in many aspects, for example, the importance, basic principle, influence factors, the diagnosis process.

Key words：infrared diagnosis；application；intuitive；complexity

电力设备发生故障时，往往伴随着相关部位的温度变化，并且这种变化是逐步发生和发展的。例如隔离开关刀口处接触不良、线夹紧固螺栓松动、氧化锌避雷器内部阀片受潮、电容式电压互感器介质损耗增大、绝缘子绝缘电阻减小、漏磁等，都会引起发热。用红外热像仪拍摄的红外图谱可以精确地捕捉到这种温度的变化，直观地显示出缺陷部位，并且可以方便地判断缺陷的程度，为检修工作提供依据。通过周期性的红外诊断工作，可以及早发地发现设备缺陷，提前采取措施，保证设备的安全运行。红外诊断技术与传统停电高压试验相比，具有范围广、效率高、安全可靠、不停电、不受电磁干扰等优点，获得了广泛应用[1-3]。

1　红外检测技术的基本原理

自然界任何温度高于绝对零度的物体都会在非常宽的波长范围内发射能量，产生电磁波。通常将波长在 0.75～1000μm 之间的电磁波称作“红外线”，也常称作“红外辐射”。不同波长的红外线在大气中传播时的衰减不同，穿透性比较好的波段称为“大气窗口”，例如 8～14μm 之间的长波窗口。热像仪有选择地接收这个波段的红外线，就可检测到物体的红外辐射能量，从而判断物体表面的温度及温度场的分布。物体温度越高，辐射的能量越大。物体辐射能量与物体温度的关系符合斯蒂芬－玻耳兹曼定律，如式（1）所示。

$$W = \varepsilon\sigma T^4 \qquad (1)$$

式中，ε为辐射率；σ为波尔兹曼常数，σ=5.6697×10^{-8}W/(m^2×k^4)。

2　红外诊断技术的诊断流程

《带电设备红外诊断应用规范》DL/T　664—2008 是进行电力设备红外诊断工作的基本依据。在此基础上，可根据实际情况，具体安排，例如可采用下述流程。

1）准备工作。明确任务，设计红外诊断路线图；检查红外热像仪及配件，开机启动，并设置参数，例如测温范围、辐射率、距离、环境温度、相对湿度等。

2）一般检测。按照设计的路线图，从较远距离、多个方位对被测设备逐一进行检测，无遗漏的设备及其应检测部位；对检测出的异常点，记录具体部位。

3）精确检测。根据被测部位，调整热像仪的参数，如距离、发射率等，对一般检测中记录的异常点进行多角度精确测温，寻找温度最高点，拍摄三相及局部最热的红外热像图、相对应的可见光图，记录正常相温度、环境温度参照体温度，结合设备负荷，初步分析判断缺陷性质。

4）诊断分析。综合使用表面温度、同类比较、相对温差、图像特征等判断方法，分析缺陷类型、性质、原因、处理措施等。

作者简介：李新星（1985-），男，硕士研究生，助工，研究方向为电力设备高压试验。

5）消除缺陷。结合高压试验，进一明确故障部位，进行针对性检修；设备经消缺投运后，应再次进行红外诊断工作，完成缺陷闭环管理。

3 红外诊断技术的影响因素

3.1 环境因素

红外线在大气中传播时，由于水分子等的影响，会有衰减，所以红外检测时空气湿度一般不大于85%。但是电力设备污秽发热往往在雾或小雨的天气才能发现，所以需根据检测项目选择适当天气。

在阳光照射下，电力设备会有一定的温升。若此时检测，由于阳光的不均匀照射，例如阴影、阴面与阳面等，可能造成误判；另一方面，阳光照射导致的温升与设备自身发热导致的温升相互叠加，会掩盖电压致热型设备等温升较低的缺陷，可能造成漏判。红外检测期间天气以阴天、夜间为宜。

风速过大时，缺陷设备的热量加速散发，改善其散热条件，使得检测温度偏低，可能误判或者漏检缺陷。一般检测时，风速不大于 5m/s。精确检测时，风速不大于 0.5m/s。

3.2 检测角度

物体的红外辐射在空间中的分布，可用式（2）所示的朗伯余弦定律来描述。检测角度会影响热像仪接收电气设备红外辐射能量的数值，不同的检测角度会检测到同一发热部位的不同温度值，所以应从多角度进行检测，找到最高温度的检测角度。一般情况下，检测角度尽量与电气设备的平面垂直，以求得真实的热点温度。

$$I_a = I_0 \cos\alpha \qquad (2)$$

式中，I_0 为辐射表面法线方向的辐射强度；I_a 为与辐射表面法线夹角为 α 方向的辐射强度。

3.3 检测距离

检测距离过远，红外线在大气中传播时有严重的衰减，影响检测温度的准确度；其次，如果热像仪镜头中温度最高的发热点的面积过小，不能覆盖探测器的一个基本像数单元，则检测到的温度值为发热点温度与背景温度的综合值，具体数值跟基本像数单元中发热点与背景两者各自所占的面积有关，会使检测温度较真实值低。检测距离可用热像仪的参数“空间分辨率（rad）”来表征，如式（3）、式（4）所示。

空间分辨率＝(2π×水平视场角)/(360°×水平像元数)　（3）

或

空间分辨率＝(2π×垂直视场角)/(360°×垂直像元数)　（4）

以某型号红外热像仪为例，水平视角 24°，水平像元数 320，则突间分辨率=0.00065（rad），表示这台热像仪可以准确检测 10m 外 0.0065×0.0065m 的一个正方形的温度。

3.4 辐射率

热像仪接收到红外辐射能量后，根据式（1）换算得到物体的温度值。在相同能量时，辐射率与温度的四次方成反比。在检测过程中，设置的目标辐射率不同，得到的设备温度值不同。一般检测时，被测设备的辐射率一般取 0.9 左右。精确检测时，根据被测设备材质设置辐射率，例如瓷套可取 0.9、隔离开关刀口铜材质可取 0.6、接线板铝材质可取 0.4、主变螺栓镀锌铁质可取 0.23、二次接线铜丝可取 0.88 等。

3.5 负荷

对电流致热型设备，其发热量与流经电流的平方成正比，发热温度随负荷波动而变化。检测时最好在高峰负荷下进行；否则，一般应在不低于30%的额定负荷下进行。

4 红外诊断技术的具体应用

红外诊断工作首先必须获得准确、清晰的红外热像图，并结合设备的结构及运维情况，才能判定缺陷的部位、类型、影响程度，然后提出相应处理方案，最终消除缺陷。红外诊断检测除发现并定性缺陷外，另一个重要原则是明确缺陷的具体部位，指导检修工作，避免返工、提高消缺陷成功率。通过实例来说明红外诊断技术的直观性与复杂性。

4.1 电缆接头

红外热像图 1 中，35kV 电缆接线板部位发热。可见光图 2 中，可直观看出电缆与接线板之间有较明显的滑动痕迹。缺陷类型：电流致热型设备缺陷。缺陷原因：由于周期性热胀冷缩、导线在风力作用下摆动、弹簧垫圈失去弹性等因素，使得压紧螺栓松动、接触表面氧化，接触电阻增大导致发热。

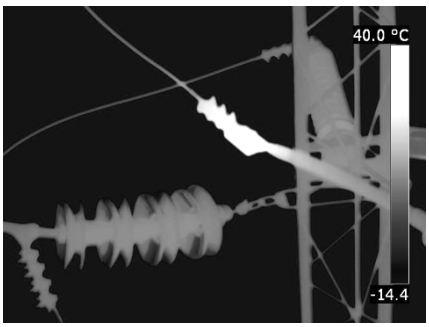


图 1　35kV 电缆接线板发热的红外热像图



图 2　35kV 电缆接线板发热的可见光图

4.2　变压器套管柱头

从变压器套管的三相整体红外热像图 3 中，可以看出两个缺陷：①A 相套管柱头部位发热，温度达 40℃，局部热像如图 4 所示；②三相套管的上部及储油柜存在温差，C 相温度较 A、B 两相高 2℃。现分别进行分析。

缺陷 1 为电流致热型设备缺陷，原因为接触电阻较大导致发热，类型常见，但具体缺陷部位分析困难。这就要求我们拍摄清晰、准确的局部红外图，并熟悉高压套管的结构，以免造成误判。高压套管柱头一般有以下三个连接部位 [4-5]：①套管接线端子（握手线夹）与外部导线接线端子连接部位；②导电头（将军帽）与套管接线端子连接部位；③变压器内部绕组引线接头与导电头连接部位。仔细分析局部红外如图 4 所示，最热点处在套管接线端子根部，有理由怀疑缺陷在 c 部位，要通过停电检修进行验证。

对于缺陷 2，应尽快进行红外复诊，排除阳光照射余温、热源反射等影响。三相瓷套本体温度一致，介质损耗增大引起电压致热型设备缺陷的可能性较小。若能排除干扰，由于 A、B 相套管有较明显的温度分界线，可初步怀疑套管缺油。通过套管油位指示消失，外部渗油，或温度分界线的位置与变压器油枕油位相同（内部渗油）等现象，可进一步明确缺陷的原因。

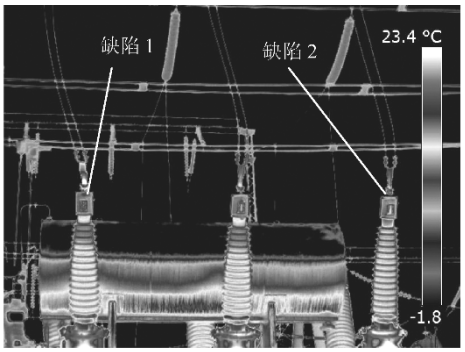


图 3　220kV 变压器的红外热像图

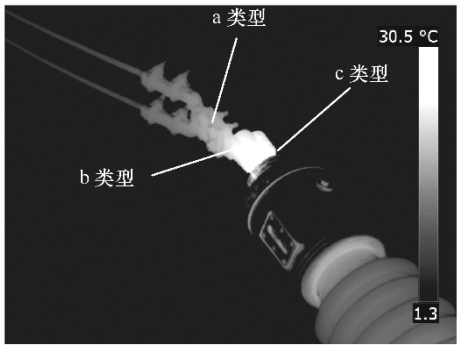


图 4　220kV 变压器高压套管柱头发热的红外热像图

4.3　隔离开关刀口

红外热像图 5 中，隔离开关刀口左侧下片触指发热，最热点在触指根部。缺陷部件的材质为铜，辐射率应设置为 0.6，准确测量发热温度为 111.3℃。若辐射率仍采用一般检测时的 0.9，则发热点温度为 86.8℃，会产生较大误差，可能使缺陷类型判断错误。缺陷原因：发热触指与触指座的接触电阻较其余部位小，通过电流过大导致发热。在检修处理时，要对所有触指与触指座的连接部位进行清洁、打磨，而不能只处理发热触指。

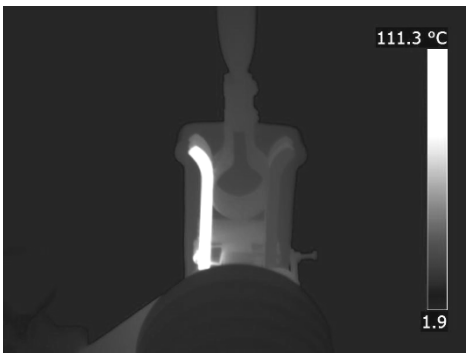


图 5　220kV 隔离开关刀口发热的红外热像图

如图 6 所示，在多对触指组成的并联支路中，发热损耗分别为

$$P_1=U^2/R_1 \quad (5)$$

$$P_2=U^2/R_2 \quad (6)$$

可见，接触电阻越小的支路，其相对的发热损耗越大，温升越高。不发热点的接触情况比发热点的情况更严重。

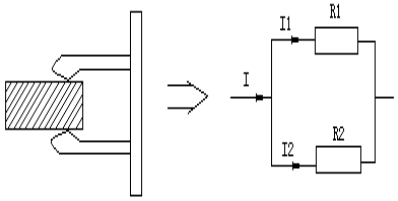


图 6　220kV 隔离开关刀口发热的等效分析图

4.4　变压器上、下壳体紧固螺栓

变压器上、下壳体紧固螺栓发热，一般有两种情况。图 7 为螺栓整体发热，温度为 42.5℃且均匀分布，正常温度 30℃；图 8 为螺栓不均匀发热，上部 56.2℃、中部 75℃、下部 56.4℃，正常温度 35℃。螺栓温度过高，会引起上、下壳体间的密封胶垫老化甚至烧坏，造成变压器漏油、缩短使用寿命。

相对应地，造成螺栓发热有两种原因[6-7]：①涡流引起发热：漏磁通通过上、下壳体交界处时，由于铁质螺栓的磁阻远小于空气，大量的漏磁通通过螺栓，在螺栓中感出较大的涡流导致发热，螺栓整体均匀发热，如图 7 所示；②电流引起发热：漏磁通在箱沿与螺栓构成的回路中产生环流；或者变压器上、下壳体处在强漏磁场中，因漏磁场密度不同感应的电势也不同，使其之间存在电位差，接触电阻小的螺栓通过较大的电流引起发热，螺栓中间通流部分的温度较上、下侧高，如图 8 所示。当热像不明显时，可将螺栓拧松观察发热情况，若为原因①，则温度变化不明显；若为原因②，则温度变化明显。或者，可用钳形电流表直接测量流经螺栓的电流值。

缺陷原因不同，相应的处理方法也不同。对图 7 缺陷，可将铁质螺栓更换为不导磁的不锈钢螺栓，同时将其用硅钢片短接，为漏磁通形成通道。对图 8 缺陷，采取措施使电流均匀地通过每个螺栓，而不集中在少数几个螺栓上，例如充分清洁螺栓与壳体箱沿的接触面，涂抹电力脂，并用力矩扳手紧固；在上、下壳体间加装若干短接连片。但是，若仅将发热螺栓与壳体绝缘，则电流会转移至相邻螺栓或其余接触电阻较小的螺栓上，使发热螺栓转移，而不能解决缺陷。

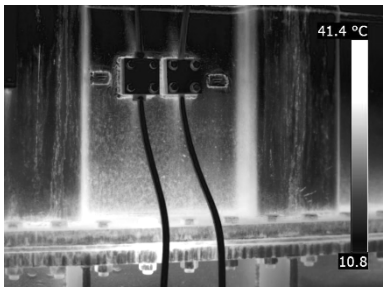


图 7　涡流导致螺栓发热的红外热像图

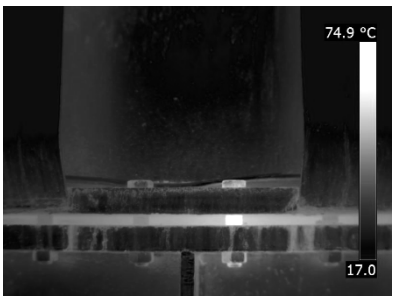


图 8　电流导致螺栓发热的红外热像图

4.5　绝缘子

对电压致热型设备缺陷，温差小，拍摄热像图时要手动调整温宽及电平，并选择彩色显示方式。图 9 采用 Iron 色，热点不明显；图 10 采用 Rain 色，热点明显。红外热像图 10 中，可以看出两处缺陷。缺陷 1，悬垂绝缘子串从导线侧数第一片绝缘子铁帽发热。缺陷 2，连接龙门架两侧跨条线所用弓字线与悬垂绝缘子串的紧固部位发热，可见光图如图 11 所示。

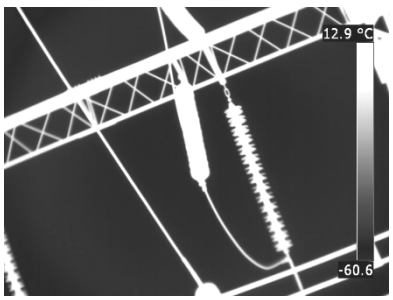


图 9　绝缘子低值发热及导线固定线夹发热的 Iron 色热像图

缺陷 1 为绝缘子低值发热[8]。220kV 绝缘子串片数为 15 片时，允许零值绝缘子片数为 7 片，因此判断为一般缺陷。

缺陷 2，由于热像图及可见光图只能观察到紧固夹件，只可初步判断为紧固部位处弓字线散股或

断股，热量传导至紧固夹件。发热部位温度无法直接测量，根据运行经验，判断为严重缺陷，尽快安排停电处理。

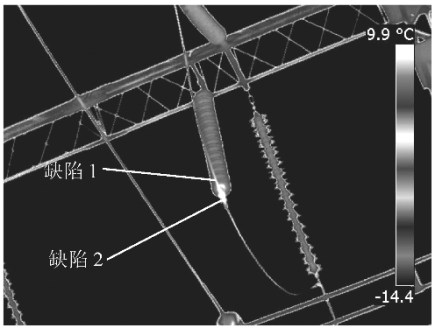


图 10　绝缘子低值发热及导线固定线夹发热的 Rain 色热像图

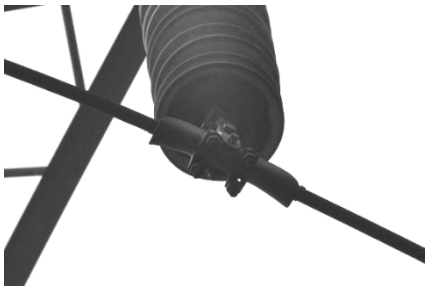


图 11　绝缘子低值发热及导线固定线夹发热的可见光图

5　结论

红外诊断是一项精细、复杂的工作，技术要求较高：①对电压致热型等温升小的缺陷，红外检测不易发现，需要一定的技巧及经验；②在热像图上可以直观地发现缺陷部位，但由于运行条件的限制，原因分析比较困难，需要停电检修结合高压试验进行验证；③对红外热像图相似的缺陷，造成发热的原因可能不同，因而采取的处理措施也不同，需要仔细分析。

另外，对开关柜、二次端子箱、直流装置、保护屏等设备开展的红外诊断工作相对较少，经验不足，相关检测周期、判断标准等不统一，需要充分探讨、深化研究。

参考文献

[1] 胡红光. 电力设备红外诊断技术与应用 [M]. 北京：中国电力出版社, 2012: 82-84.
[2] 魏钢，冯中正，唐跃林，等. 输变电设备红外故障诊断技术与试验研究 [J]. 电气技术, 2013(6): 75-78.
[3] 陈昱同，何杰，闫杰. 红外诊断在电力设备状态检修中的应用 [J]. 山西电力, 2011(3): 16-19.
[4] 舒均盛. 变压器高压套管将军帽检修工艺探讨 [J]. 变压器, 2010(1): 63-65.
[5] 陈润晶，赵爱丽，刘爽，等. 变压器套管将军帽发热原因分析及对策 [J]. 变压器, 2012, 49(10): 61-64.
[6] 赵晨. 大型电力变压器箱沿螺栓过热的分析及处理 [J]. 变压器, 1995, 32(1): 35-36.
[7] 陆继谋，覃广意 . 500kV 变压器钟罩螺栓过热原因分析及处理 [J]. 广西电力, 2012(2): 51-54.
[8] 胡世征. 劣化绝缘子的发热机理及热象特征 [J]. 电网技术, 1997, 21(10): 44-46.

New 新闻与动态

国内首个进站充电有轨电车项目开通试运行

近日，由中国电子科技集团公司负责全线通信、信号、消防等设备系统建设的南京河西现代有轨电车 1 号线正式开通试运行。它在国内首次采用 “进站充电”方式，也是首次运用新型有轨电车信号系统和安全系统，直接服务于即将开幕的第二届夏季青年奥运会。

据悉，南京河西现代有轨电车 1 号线全长 7.5km，共 13 个车站，采取三个国内 “首次”，破解老式有轨电车弊端。 一是首次采用无接触网有轨电车供电模式，采取“进站充电”方式，电车进入站台方将 “辫子”伸起充电，不破坏城市景观；二是首次采用中国电子科技集团公司研制的新一代现代有轨电车信号调度系统，半封闭式管理形成“专车专道”，最大限度减少与机动车行驶路线的重叠，提高了系统安全性；三是在车辆基地停车库首次采用吸气式感烟探测器，有效监控火灾发生，保障安全运营。

我国城市交通拥挤状况日趋严重，发展运量大、速度快、安全可靠、准点舒适的轨道交通，成为解决城市交通紧张状况的有效途径之一。城市有轨电车与地铁相比具

有造价低、施工条件低、运维方便等优势，与公交汽车相比具有运量大、行驶平稳、按时准点、零排放等优势。老式有轨电车由于轨道并非“专车专用”，容易与机动车“争道”，并且受技术所限容易形成安全隐患 。