



电力设备故障红外诊断

陈衡 侯善敬 著

电力科技专著出版基金资助项目

中国电力出版社

内 容 提 要

本书从提高电力设备运行可靠性出发,本着理论与实践相结合的原则,全面系统地论述了电力设备故障红外诊断的原理和实践。除有针对性地讲述设备故障信息的红外探测原理、信息采集与处理方法、红外检测仪器的工作原理与选择方法外,还以现场实践为基础,重点翔实地分析了八大类高压电气设备各种内外故障的红外热像特征、典型红外图谱和进行定性、定量及定位诊断的判别方法。另外还扼要讨论了热能动力系统故障与电力设备零部件内部缺陷的红外诊断方法,以及红外诊断进一步发展的方向和有关的理论问题。

本书主要读者对象是科研院所及现场从事电力设备故障诊断与维护的专业科技工作者和设备管理人员,也可供高等院校有关专业研究生或高年级本科生用作教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力设备故障红外诊断/陈衡,侯善敬著. —北京:中国电力出版社,1998.10

ISBN 7-80125-923-8

I. 电… II. ①陈… ②侯… III. 高电压-电气设备-红外线检测-故障诊断 IV. TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 29392 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

实验小学印刷厂印刷

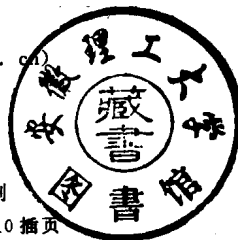
各地新华书店经售

*

1999 年 1 月第一版 1999 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 26.5 印张 604 千字 10 插页

印数 0001—3000 册 定价 44.00 元



版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

众所周知,电能的生产、输送和分配使用是个连续过程,其中任何一个环节发生事故都会危及整个系统正常运行。因此,电力设备运行状态的在线监测和故障诊断,使设备从传统的预防性检修提高到预知性状态维修,对提高设备运行可靠性与有效度,提高电力系统运行经济效益,降低维修成本,都有很重要的意义。随着现代电力工业向着高电压、大机组、大容量的迅速发展,电力系统对安全可靠运行提出了越来越高的要求。因此,对电力设备运行状态的监测、故障诊断和及时维修日益受到人们的高度重视。然而长期以来国内电力系统主要采用预防性维修体制,制订的一系列标准、规程和措施,虽然对防止事故发生和保障系统安全运行发挥了重要作用,但设备运行可靠性仍不能满足要求,各种突发事件时有发生。尽管近年来国内电力行业在努力开发各种在线监测手段和方法,可是由于各种原因,发展水平和推广使用状况仍然比较落后。

随着现代红外技术不断成熟和日臻完善,利用红外检测的远距离、不接触、准确、实时、快速等特点发展起来的电力设备状态红外监测技术,由于在不停电、不取样、不解体的情况下能快速实时地在线监测和诊断电力设备的大多数故障,所以备受国内外电力行业的重视,并得到快速发展。然而,与这种发展不相适应的是至今国内外尚未出版系统论述电力设备故障红外诊断理论与实践的科技著作。为了适应这种需要,我们迈出了一步,进行大胆的尝试。

严格讲,现代设备故障诊断学应包括诊断理论和诊断技术两大部分内容。而在本书中,为了尽量做到理论与实践的完美结合,始终以电力设备故障信息的红外检测、分析和诊断判别为中心,以我们多年从事红外技术基础研究和14个省约500座发电厂及变电站现场检测与红外诊断为基础,并结合电力设备故障红外诊断的模拟试验研究,努力实现有关知识体系的系统化。

本书初稿完成于1991年,并在华北电力大学几届研究生教学中试用。1995年后,原电力工业部西安热工研究院侯善敬教授级高级工程师及其合作者——珠海英达新技术研究所何佑工程师、福建电力试验研究所廖福旺工程师等、江西电力试验研究所陈洪岗工程师等、西宁供电局白谊春工程师和天水供电局郭伟民高级工程师等,提供了许多有价值的现场诊断资料和模拟试验结果。另外,河北农业大学邝朴生教授、河南电力试验研究所范回中总工程师、邯郸供电局

胡世征总工程师、东北电力研究院曾庆立工程师、天津电力公司技术中心干耀生高工和电力工业部苏州热工研究所夏时雷工程师也提供了重要资料，最后由华北电力大学陈衡教授统一执笔定稿，并得到尹增谦同志的许多帮助。本书部分书稿得到了原华北电管局总工李常禧的审阅。在此，对为本书出版做出贡献和帮助的上述有关单位及各位朋友和专家，一并致以诚挚的谢意！

由于水平所限，书中缺点错误在所难免，衷心希望读者不吝赐教。

作 者

1998 年春节 于保定

前 言

第一章	概论	1
第一节	电力设备的故障与维修	1
第二节	电力设备故障红外诊断的基本原理和技术特点	5
第三节	电力设备故障红外诊断的适用范围和局限性	8
第四节	电力设备故障红外诊断的发展与研究方向.....	11
第五节	电力设备故障红外诊断的知识体系.....	14
第二章	电力设备故障红外诊断原理	15
第一节	电力设备的主要故障模式及其机理.....	15
第二节	电力设备故障的发展与演变.....	24
第三节	电力设备故障红外诊断的数学基础.....	29
第四节	电力设备故障信息的红外探测原理.....	31
第三章	红外诊断常用的基本仪器与故障信息的采集	59
第一节	红外辐射测温仪.....	59
第二节	红外行扫描器.....	76
第三节	红外热像仪.....	80
第四节	红外热电视	102
第四章	高压电气设备故障的红外特征参数诊断	111
第一节	正常状态下高压电器发热特征与规律	112
第二节	电机类设备故障的红外诊断与典型红外图谱	120
第三节	通断类设备故障的红外诊断与典型红外图谱	130
第四节	高压套管故障的红外诊断与典型红外图谱	139
第五节	电力变压器故障的红外诊断与典型红外图谱	145
第六节	限压类和限流类设备故障的红外诊断与典型红外图谱	153

第七节	电力电容器故障的红外诊断与典型红外图谱	166
第八节	互感器故障的红外诊断与典型红外图谱	172
第九节	载流设备故障的红外诊断与典型红外图谱	183
第十节	架空高压输电导线故障的红外诊断与典型红外图谱	188
第十一节	绝缘子故障的红外诊断与典型红外图谱	200
附录 4-1	载流导体长期工作发热和短时发热的允许温度	210
附录 4-2	交流高压电器在长期工作时的发热 (GB763—90)	210

第五章 提高红外检测和诊断准确性的

	技术方法与管理	212
第一节	影响检测准确性的因素与对策	212
第二节	提高诊断准确性的技术方法	227
第三节	故障诊断报告与技术管理	237
附录 5-1	常用材料表面发射率参考值	241

第六章 电气设备故障红外诊断的数学方法与智能化 244

第一节	设备故障诊断的模式识别方法	244
第二节	故障诊断的参数估值法和传输函数法	254
第三节	电气设备故障红外诊断的智能化	257

第七章 电厂热能动力系统状态监测与红外诊断 267

第一节	电厂锅炉火焰监测与燃烧状态诊断	267
第二节	热力设备疲劳损伤的研究与红外诊断	283
第三节	热力设备热机械学特征规律研究的红外方法	286
第四节	热力系统漏热诊断与保温评价	291
第五节	红外诊断技术在电厂中的其他应用	297

第八章 电力设备零件缺陷的红外无损检验 301

第一节	红外无损检验的基础知识与原理	301
第二节	调制式红外无损检验	308
第三节	红外无损检验系统与检测特点	312
第四节	电力设备零件缺陷的红外无损检验	320
第五节	高压复合绝缘材料内部缺陷的红外无损检验	323

第九章 设备故障红外诊断中的第一类理论研究问题 326

第一节	热传递的基本定律与导热微分方程式	327
第二节	简单稳态导热问题的解析解	332
第三节	稳态导热问题的数值分析方法	336
第四节	非稳态导热问题的解析解	340
第五节	非稳态导热问题的数值分析方法	349

第十章 设备故障红外诊断中的第二类理论研究问题

	与红外热诊断学	367
第一节	红外热诊断学与导热反问题	367
第二节	平板和棱柱部件内部空腔缺陷的红外热诊断	372
第三节	单层设备内壁任意形状缺陷的红外热诊断	385
第四节	双层设备内壁任意形状缺陷的红外热诊断	400
结束语		412
参考文献		413

概 论

本章扼要讨论设备可靠性、故障与有效度等基本概念，并从提高设备有效度的角度，简单评述三种设备管理维修体制，在此基础上着重讨论电力设备运行状态红外监测和故障红外诊断的基本原理、技术特点、适用范围与发展概况。

第一节 电力设备的故障与维修

众所周知，电力生产与供应的最大特点是过程的连续性。也就是说，从电能的发出、输送到分配给用户使用，整个过程都是在瞬间完成和连续进行的。其中任何一个环节上的任何设备一旦出了问题，都会直接或间接地影响到整个系统的正常安全运行，甚至会带来巨大的经济损失或生命财产损失。尤其随着现代电力工业不断向着大机组、大容量和高电压的迅速发展，运行条件更加苛刻，故障率和事故率逐渐增加，排除故障所需要的时间越来越长，造成的经济损失越来越大。为了保障发电和输变电系统的安全、经济运行，国内外电力行业普遍对电力设备运行的可靠性，提出了越来越高的要求。

一、设备的可靠性与故障

所谓设备的可靠性，广义地讲，就是设备在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的能力。与此相反，如果在规定的条件下和规定的时间内，设备整体或局部丧失（或部分丧失，即降低）完成规定功能的能力，则称设备出现故障。或者简单讲，故障就是设备丧失规定的功能。

可靠性是反映设备或产品能否经久耐用的质量指标之一，并用可靠度或可靠寿命来度量。所谓可靠度，就是在规定的条件下和规定的时间内，设备不发生故障的概率。或者，也可以把可靠度理解为设备在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的概率或无故障工作概率。而可靠寿命则是指在规定的可靠度下设备的工作时间。通常可用平均无故障工作时间（MTTF）或平均故障间隔时间（MTBF）来表征。其中，前者是指设备从开始使用到首次发生故障前的平均工作时间，后者则指可修复设备在相邻两次故障之间的平均工作时间。

显然，与可靠性对立的事件就是不可靠性事件或故障，而反映不可靠性程度的度量，就是故障率或严格称为故障概率密度。它是指到某时刻尚未发生故障的设备（或产品），在后

续的单位时间内发生故障的概率。对于可靠寿命服从指数分布的设备，其故障率与平均故障间隔时间（MTBF）互为倒数关系^[134]。因为设备发生故障的可能性是随其使用时间而变化的，所以，故障概率密度（即单位时间内发生故障的概率或故障率）是时间的函数，因此又可称为故障分布函数，可用 $f(t)$ 表示。于是，设备的无故障概率密度（或称可靠度分布函数）应该用函数 $1-f(t)$ 表示。这样一来，就可以得到设备在其使用时间内的累积故障概率（即不可靠度）为

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1-1)$$

而设备在该段时间内的可靠度（即无故障工作概率）为

$$R(t) = \int_0^t [1 - f(t)] dt = 1 - F(t) \quad (1-2)$$

由式（1-1）和式（1-2）可以看出，一个良好设备开始使用时（ $t=0$ ），累积故障概率 $F(t=0)=0$ ，可靠度 $R(t=0)=1$ 。但是，任何设备，不论其质量如何高，当使用时间足够长时（ $t \rightarrow \infty$ ），总是要发生故障的，因此，最终必然出现累积故障概率 $F(t \rightarrow \infty)=1$ ，而可靠度 $R(t \rightarrow \infty)=0$ 。

应该指出，关于设备可靠度和故障率的上述讨论，都是针对大量设备的统计平均而言的。至于具体到其中的某一台设备在某段时间内是否肯定可靠，或是否必然发生故障，并不能给出确切的回答，而只能预测它发生故障的可能性。另外，在现场中，也往往用某段时间的故障次数与设备总台数之比来定义故障率。例如，电网的年故障率定义为

$$\text{年故障率} = \frac{\text{年故障次数}}{\text{运行中的设备台数}} \times 100\% \quad (1-3)$$

这个定义与前面叙述的故障率实质上是一致的。

二、设备的有效度与维修

对于可修复设备而言，出现故障并不等于该设备就完全失效或报废，经过维修后仍可延长设备的正常工作时间。但是，设备在停修时间内毕竟并未工作，因此影响了设备的使用率。这样一来，对于可修复设备而言，就有一个在某时刻经过维修而维持其规定功能的属性，该属性用有效度（或可用率）来度量。有效度可定义为^[133,134]：

$$A = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 A ——有效度或可用率，它反映的是可修复设备在规定时刻保持其功能的概率，或者是在某一统计时期内，设备保持其功能的时间所占的比例；

MTTF——设备的平均无故障时间；

MTTR——平均停修（非工作）时间。

如果从设备实际使用寿命的角度来讨论设备的可用率，则与式（1-4）相对应，可以用设备的可用时间与不可用时间来定义设备的运行有效度^[134]：

$$\text{运行有效度} = \frac{\text{可用时间}}{\text{可用时间} + \text{不可用时间}} \times 100\% \quad (1-5)$$

式（1-4）表明，为了提高设备的有效度或可用率，必须从延长设备的平均无故障时间

(即提高可靠性)和缩短平均停修时间两方面入手。然而,提高设备可靠性总是有限度的,即使可靠性再高的设备也不可避免地要出现故障。因此,除了在新型设备的设计中,必须考虑力求便于维修和尽可能简化维修内容等项以外,对于已投运的设备而言,则必须根据式(1-5),设法缩短因维修所浪费的工作时间或不可用时间。其中,不可用时间通常包括预防维修时间(日常保养和计划维修)、故障维修时间和其他管理时间。而故障维修时间又包括准备时间、测试诊断时间、拆卸修配时间和装调检查时间。对于复杂的设备系统,故障往往是偶然发生的,而且,在排除故障之前的诊断时期内,有些故障不一定再现,仅通过故障的外部现象很难立即判定故障的属性与具体部位,这就使得故障的查找与诊断过程不得不占去故障维修的大部分时间,因而妨碍了故障维修时间的缩短和运行有效度的提高。这就迫使人们必须在两个方面做出努力:一是在进行新型设备设计或设备选型时,务必注意可诊断性设计,即赋予新型设备本身具有故障易监测、易定位和易诊断的属性;二是开发先进的诊断技术,提高故障发现率(即故障检出率)和分辨力,降低误诊率(即虚惊概率),减少诊断工作量和诊断费用,从而达到缩短维修时间和提高设备有效度与运行有效度的目的。

三、电力设备维修体制的发展与红外诊断的提出

与其他工业设备一样,电力设备管理维修体制发展至今基本上已有三种类型,即事后维修体制、预防维修体制和状态维修(或预知维修)体制。

1. 事后维修体制

所谓事后维修体制,就是在设备发生故障乃至事故之后才进行维修。通常,这种维修体制只适用于造价较低、事故停机带来的直接或间接损失不大的设备(如电力用户或配电线路中的熔断器等),或者在关键部位具有备份装置的贵重设备^[134]。如果对于无备份装置的大型设备也采用直到事故发生后才进行维修的体制,则必须借助先进的现代诊断技术,随时准确预报设备“已存在什么隐患?什么时候会发生故障?”等,以便现场管理人员事先做好备件和人力安排,在尽可能短的时间内完成高质量的维修工作。但是,对于任何设备,要想事先准确地预报发生事故的部位和时间都是十分困难的。因此,事后维修体制往往会造成相当大的经济损失。例如,1975年华东电网谏泰大跨越长江线路2号导线在运行中突然断线坠江,虽然经过紧急抢修,并启用备用的4号导线代替2号导线供电,但仍使苏北地区大面积停电长达15h之久,使工农业生产遭受巨大损失,造成国民经济损失达数亿元以上^[49]。

2. 预防性维修体制

预防性维修体制是针对某些无备份装置的重要设备或因意外停机会造成巨大损失的设备实行的维修体制。它是以时间为依据的定期维修体制,即根据经验和统计资料,为保障设备完好率处于一定水平而进行的定期维修体制。我国电力行业长期以来执行的是这种预防性维修体制,并且制订了相应的部颁行业标准《电力设备预防性试验规程》^[25]等。不可否认,尽管定期进行预防性试验和维修对于排除某些事故隐患和降低故障率,的确发挥了一定的积极作用,但是,定期进行的预防性试验和维修,也具有一系列难以克服的缺点:

1) 预防性试验都是在停电或停运条件下进行的,影响正常运行,费时、费力,不仅减少了设备的可用时间,增加了不可用时间,降低了运行有效度,而且,还检测不到设备在

运行中的真实技术状态。有时还会因废弃许多尚可应用的零部件和增加不必要的拆装次数，使得维修费用大大增加。

2) 预防性试验条件往往不同于设备的正常运行条件，有些已经存在的故障不易发现，尤其更难以预防由于随机因素引起的偶发性故障，致使有些经预防性试验认为“合格”的设备，投运后不久仍发生重大事故。例如，某省曾在五六年间连续发生八台耦合电容器的绝缘损坏事故，其中五台爆炸，三台喷油。然而，事故前的历次预防性试验结果都表明设备是合格的。又如某电厂一相耦合电容器上节元件长期过热已十分严重，但当停电试验时，却发现该耦合电容器的介质损耗等项指标基本正常，甚至比其他邻相元件指标还低。出现这种现象的主要原因是预防性试验条件不同于现场实际运行的条件。以介质损耗试验为例，现场预防性试验大多数都是在较低电压下进行的（通常为 10kV），而有的设备介质缺陷或结构上的故障，在低压下难以暴露出来，只有在实际运行状态下的较高电压时，局部或整体缺陷才能表现出来。除绝缘故障以外，高压电气设备的其他类型故障，在预防性试验中，也有时会出现漏检和漏修的现象。

3) 有些本来没有故障的正常设备，经拆卸进行预防性试验后复装时，反而引入了新的事故隐患。例如，有的设备在复装时因紧固螺栓未拧到位而引入导流回路连接故障，或因密封不良而引入受潮故障，或因不慎掉入杂质而造成绝缘介质劣化，有的变压器套管因未排气而造成缺油等。实践经验表明，在相当多的情况下，频繁拆卸设备或更换零部件，不但不能改善设备性能，反而在每次预试复装后都会引入新的故障。

3. 状态维修体制

状态维修体制是在 20 世纪 70 年代初期发展起来的一种较先进的设备维修体制。这种维修体制不再以时间为依据进行常规的定期检测试验与维修，而是着眼于密切追踪监测每台设备具体运行技术状态的发展、变化情况，并根据规范化的状态监测结果，掌握设备运行状态（或设备故障）演变的情形和恶化的程度，对故障设备的维修做到心中有数，实现“无病不修，有病才修，修必修好”。因此，有人也把设备的状态维修称为视情维修^[134]或预知性维修。

从上面的简单讨论不难看出，状态维修体制具有如下优点：

1) 通过降低维修次数，延长大修时间间隔，缩短维修时间，可以减少停运损失，提高设备可靠性和运行有效度，提高设备利用率和生产率，节约设备维修费用，降低设备全寿命周期成本。

2) 由于状态维修体制往往是以设备运行状态下的在线监测结果为依据进行的维修，所以能够预报故障的发生时间和起因，可以有效地防止发生意外的突发事件。

3) 状态监测能够预测已有故障隐患对设备其他零部件的影响与作用，可以消除设备已有故障诱发的二次性损坏。

正是因为状态维修具有上述的突出优点，所以，国内外电力行业、其他工业界以及学术界，都十分重视研究和推广这种维修体制。我国电力系统多次召开专业学术会议，交流和推广状态监测与状态维修方面取得的成果。

应该承认，现代设备状态维修的技术基础是故障信息的状态监测与故障诊断。因此，为

了实现状态维修,一方面在制造设备时,在其适当部位安装采集状态信息的机载在线监测传感器,或在运行设备上设置状态监测用的各种仪表和报警系统,进行接触式故障信息监测;另一方面,根据许多电力设备故障均会产生温度异常的特点,利用现代红外测温技术,发展了电力设备运行状态的非接触式红外在线监测与故障诊断方法。在1990年国际大电网会议(CIGRE)上,电力设备运行状态的红外监测与故障红外诊断得到了足够的重视和肯定。

第二节 电力设备故障红外诊断的基本原理和技术特点

众所周知,人体病变往往引起体温升高,因此,医生总是通过测量患者体温并配合其他检验结果对人的疾病做出病理诊断。与此类似,在电力系统的各种设备中,往往由于出现故障而导致设备运行的温度状态发生异常,因此通过监测电力设备的这种状态变化,可以对设备故障做出诊断。

一、电力设备状态红外监测与故障诊断的基本原理

设备故障红外诊断的前提,首先是用红外方法监测到设备运行状态的变化及故障信息。

在电力系统的各种电气设备中,导流回路部分存在大量接头、触头或连接件,如果由于某种原因引起导流回路连接故障,就会引起接触电阻增大,当负荷电流通过时,必然导致局部过热。如果电气设备的绝缘部分出现性能劣化或绝缘故障,将会引起绝缘介质损耗增大,在运行电压作用下也会出现过热;具有磁回路的电气设备,由于磁回路漏磁、磁饱和或铁芯片间绝缘局部短路造成铁损增大,会引起局部环流或涡流发热;还有些电气设备(如避雷器和交流输电线路绝缘瓷瓶),因故障而改变电压分布状况或增大泄漏电流,同样会导致设备运行中出现温度分布异常。另外,对于火力发电厂的热动力设备而言,锅炉熄火或燃烧不正常,会改变炉膛火焰温度;输热管道保温隔热材料性能不佳、破损或施工不合格,不仅降低系统的热效率,而且还会因漏热而增大表面温度;其他原因,如动力机械因润滑不良引起磨损,也会导致轴系过热等。总之,许多电力设备故障往往都以设备相关部位的温度或热状态变化为征兆表现出来。

第二章的讨论将证明,世间万物都会发射人眼看不见的红外辐射能量,而且,物体的温度越高,发射的红外辐射能量越强。因此,既然电力设备故障绝大多数都以局部或整体过热或温度分布异常为征兆,那么,只要运用适当的红外仪器(见第三章)检测电力设备运行中发射的红外辐射能量,并转换成相应的电信号,再经过专门的电信号处理系统处理,就可以获得电力设备表面的温度分布状态及其包含的设备运行状态信息。这就是电力设备运行状态红外监测的基本原理。由于电力设备不同性质、不同部位和严重程度不同的故障,在设备表面不仅会产生不同的温升值,而且会有不同的空间分布特征,所以,分析处理红外监测到的上述设备运行状态信息,就能够对设备中潜伏的故障或事故隐患属性、具体位置和严重程度作出定量的判定。这就是电力设备故障红外诊断的基本原理。

二、电力设备故障红外诊断的技术特点

与传统的预防性试验和离线诊断相比,红外诊断方法具有以下的技术特点。

(1) 不接触、不停运、不取样、不解体。由于电力设备故障的红外诊断是在运行状态下，通过监测设备故障引起的异常红外辐射和异常温度场来实现的，也就是通过红外辐射测温来获取设备运行技术状态和故障信息的，所以，红外诊断方法是一种遥感诊断方法，在监测过程中，始终不需要与运行设备直接接触，而是在与设备相隔一定距离（通常在 5m 以外）的条件下进行监测。既不需要像色谱分析那样进行取样，也不需要像以往做电力设备预防性试验那样进行设备解体或接触式测试。所以，红外监测时可以做到不停电、不改变系统的运行状态，从而可以监测到设备在运行状态下的真实状态信息，并可保障操作安全。另外，由于红外诊断具有这“四不”特点，所以，可以做到省时、省力、降低设备维修费用，大大提高设备的运行有效度。例如，一座大中型容量变电站的所有电气设备进行一次全面红外检测，通常只需要 30min，最多不超过 4h 即可完成，大大缩短了不可用时间。

(2) 采用被动式监测，简单方便。由于红外监测基于探测运行设备及其相关部位自身发射的红外辐射能量，因此，不需要像超声波或 X 射线无损检测那样另备辅助信号源，也不需要像某些常规预防性试验（如电气性能测试、色谱分析、油中微水量测量等）那样的各类检测装置。因此，这种被动式监测与诊断方法具有诊断手段单一、操作方便的特点。

(3) 可实现大面积快速扫描成像，状态显示快捷、灵敏、形象、直观，监测效率高，劳动强度低。

当使用成像式红外仪器进行检测时，能够以图像的形式，直观地显示运行设备的技术状态和故障位置。例如，虽然一座大中型容量的变电站有众多的各类电气设备，它们的运行状态不同，完好程度各异。但是，只要在适当位置用红外热像仪扫描一周，则可初步找出有故障的设备。如果进一步对初步扫描中发现的异常状态设备进行有目的的详细检测与分析，则能够在现场得到与设备故障相应的特征性红外热像图、温度分布及温度量值，因此，可以迅速、形象、直观地显示出设备的运行状态和有无故障，以及明确给出故障的属性、部位和严重程度。由于目前已商品化的先进红外热像仪温度分辨率可达 $0.02\sim 0.05^{\circ}\text{C}$ ，空间分辨率可达 0.07mrad ，因此，红外成像诊断给出的故障显示，不仅形象、直观，而且具有较高的准确性。另外，由于红外检测的响应速度快，红外诊断仪器普遍有很高的数据采集速度，一台先进的红外热像仪每秒可采集和存储百万个温度点。因此，红外监测方法不仅能够进行温度的瞬态变化研究和大范围设备温度变化的快速实时监测，而且，当被测设备与监测仪器作高速相对运动时，仍能完成监测任务。这就为监测高速旋转设备技术状态，以及在直升飞机上用红外方法检测输电线路中的故障提供了可行性。与以往检测高压输电线路接头连接故障及劣化绝缘子的传统的人工徒步观测和登杆塔检测方法相比，不仅大大提高了检测效率，而且降低了劳动强度，同时又可以不受地理环境条件的限制。例如，当把红外热像仪装在直升飞机上进行巡线检测时，能够以 $50\sim 70\text{km/h}$ 的速度检测高压输电线路上的所有接头、连接件和线路绝缘子串瓷瓶出现的故障，即使跨越山川峡谷和线路走廊存在森林或建筑物的线路段也不受影响。

(4) 红外诊断适用面广，效益、投资比高。众所周知，在当前电气设备预防性试验使用的各种测试方法中，如色谱分析、局部放电试验、泄漏电流和阻性电流测试、声学检测和直阻测量、耐压试验等，每一种方法都不可能适用于所有电气设备各种故障的检测。但

是,从监测方法来讲,红外成像监测原则上几乎能够适用于发电厂和变电站所有高压电气设备中各种故障的检测。尽管由于红外诊断仪器及其辅助装置都是高技术产品,一次性投资高于常规检测仪表,但是,由于红外监测是设备运行状态的在线监测,不影响设备正常运行,不停电,增加设备的可使用时间和运行有效度,延长了设备的使用寿命和无故障工作时间。因此,考虑到这些特点带来的技术经济效益和社会效益后,普遍认为,红外诊断的效益、投资比之高是它的一个突出特点。因为任何一台关键性电力设备因突发性事故损坏所带来的设备损失和停电造成的电力用户间接经济损失,都会远远超过红外诊断仪器投资的许多倍。如1996年西北某供电局一台220kV电流互感器突然爆炸,造成直接设备损失157万元。有些重大事故,甚至会导致数以亿元计的损失。然而,应用红外诊断方法对所有电力设备进行定期普查和重点跟踪监测,使设备故障率降到最低限度,能够收到明显的投资效益。例如,意大利应用红外方法每两年诊断一次主要变电站设备的所有零部件,使故障率下降一半;比利时三家电力公司定期使用红外方法诊断变电站设备,使故障率从1971年的2.35%下降到1977年的0.24%;国外某公司作为控制热损失的分析手段,节约的费用和红外监测仪器投资之比为27:1。这些统计结果都表明,红外诊断的效益、投资比的确是十分可观的。

(5)易于进行计算机分析,促进向智能化诊断发展。目前的红外成像诊断仪器普遍配备微型电子计算机图像分析系统和各种功能处理软件,不仅可以对监测到的设备运行状态进行分析处理,并可根据对设备红外热图像有关参数的计算和分析处理,迅速给出设备故障属性、故障部位及严重程度的定量诊断。而且,可以把历次检测得到的设备运行状态参数或图像资料存储起来,建立设备运行状态档案数据库,供管理人员随时调用,便于对设备的科学化管理和剩余使用寿命的预测。另外,诊断方法、数据处理和结果管理的计算机化,也有利于最终实现电力设备故障诊断的智能化。

(6)红外监测与故障诊断有利于实现电力设备的状态管理和向状态维修体制的过渡。如前所述,由于红外监测到的是设备在运行中的真实技术状态,它通过每一台设备在运行中的温度场分布信息给出各设备整体或局部的技术状态和有无故障出现。因此,当把所有设备在运行中的温度场分布信息存入电子计算机后,设备管理人员就可以对管辖的所有设备运行状态实施温度管理,并根据每台设备的状态演变情况进行有目的的维修。而且,通过红外诊断还可以评价设备的维修质量。

应该承认,任何一种先进的技术方法都不可能是完美无瑕的,红外诊断也不例外。就目前发展水平而言,红外诊断的主要不足在于:

1)标定较困难。尽管红外诊断仪器的测温灵敏度很高,但因辐射测温准确度受被检测表面发射率及环境条件(如气象条件等)的影响较大,所以,当需要对设备温度状态做绝对测量时,必须认真解决测温结果的标定问题。

2)对于一些大型复杂的热能动力设备和高压电气设备内部的某些故障诊断,目前尚存在若干困难,甚至还难以完成运行状态的在线监测,需要在退出运行的情况下进行检测,或者需要配合其他常规方法做出综合诊断。

第三节 电力设备故障红外诊断的适用范围和局限性

在电力系统应用红外诊断技术的初始阶段,人们普遍认为,红外方法只能用来查找电气设备和输电线路的裸露过热电气接头。如高压输电线路上的各种连接件、跳线夹、引流线夹、并沟线夹、裸露的刀闸刀口和触头,以及各种高压电气设备与线路连接的T形接头和出线接头的不良连接等。其实,随着电气设备故障红外诊断技术研究的深入发展,特别是通过对高压电气设备内部故障发热的传热分析与模拟试验研究,并结合大量现场监测统计分析,人们逐渐掌握了各类高压电器不同故障发热的热场分布规律与表面红外热像特征。因此,除某些电气设备的少数内部故障以外,凡是内部的故障发热能够在设备外部有温度响应的故障,均适于应用红外方法做出诊断。所以,我们可以讲,红外方法原则上可以覆盖所有电气设备各种故障的诊断。下面将着重从故障的发热机理,说明电力设备故障红外诊断的适用范围。

1. 高压电气设备内部导流回路故障的诊断

许多高压电气设备的内部导流回路因连接不良,接触电阻增大而出现过热。例如,发电机定子绕组线棒接头焊接不良,变压器套管内部引线连接不良,高压断路器内部动静触头、静触头基座及中间触头接触不良,电流互感器内部一次绕组端部接头、大螺杆接头和串并联接头连接不良,电力电缆头内部焊接不良等。此类内部导流回路故障的发热功率与负荷电流平方成正比,并通过特定的传热路径在设备表面相关部位形成局部特征性热场分布或红外热像。当改变负荷电流时,其发热功率和表面红外热像也随之改变。所以,通过扫描记录设备表面的红外热像,不仅可以分辨设备内部导流回路有无连接不良故障,而且还可以判定内部连接故障的具体位置。并且,根据设备表面温升值的大小,定量判定内部导流回路连接故障的严重程度,即对故障程度进行分等定级。

2. 高压电气设备内部绝缘故障的诊断

许多高压电气设备的内部绝缘由于密封不良,进水受潮,或者因绝缘介质老化,介质损耗增大,都会导致电气绝缘性能下降,甚至会出现局部放电或击穿。例如,发电机定子绕组主绝缘劣化、脱壳与击穿,变压器套管或避雷器进水受潮,高压油断路器受潮或油质劣化,电力电容器受潮、绝缘介质老化或介损增大,电压互感器整体受潮、绝缘老化和局部放电,电流互感器整体受潮、绝缘老化、放电及电容屏部分击穿,电力电缆进水受潮、绝缘老化、击穿或相间放电等等。此类故障的发热功率与运行电压的平方成正比,而与负荷电流大小无关。绝缘故障的外部特征,往往是出现设备整体性发热,并且表现为温度上高下低(或表面温度场等温线呈倒三角)的热场分布;温度高于正常运行的发热,并在出现局部放电时还会叠加有相应的局部发热特征;在改变负荷的情况下外部红外热像无明显变化。据此,可判定为设备出现相应的绝缘故障。若再参照表面温升值,则能够做出绝缘故障严重程度的定量判断。

3. 铁磁损耗或涡流故障的诊断

具有磁回路的高压电气设备，由于设计不合理或运行不正常而造成漏磁，或者由于铁芯质量不佳或片间局部绝缘破损，引起短路环流和铁损增大，可分别导致铁制箱体涡流发热或铁芯局部过热。例如，发电机和电动机定子铁芯过热故障，变压器、电抗器、电压互感器和电流互感器铁芯片间短路故障，变压器和电抗器箱体涡流发热，电流互感器二次回路阻抗过大引起的过热等。此类故障发热的特点都是形成以环流或涡流中心为最高温度的过热区。其中，除发电机、电动机和油浸变压器等大型电器铁芯短路故障需要退出运行并外施励磁电源（油浸变压器还需吊罩）后进行红外检测外，其他设备的铁芯故障和涡流故障都可以进行在线监测和诊断。但是，由于电压互感器和电流互感器铁芯故障发热的外部红外热像特征与其绝缘故障的外部特征很相似（见第四章），所以，此时除根据设备表面温升值上的差异（通常铁芯故障引起的表面温升较高）以外，还可以通过改变负荷做出鉴别。即铁芯故障在减小负荷至零时，其表面特征性红外热像随之消失，而绝缘故障的特征性红外热像却不随负荷大小变化。

4. 电压分布异常和泄漏电流增大故障的诊断

有些高压电气设备虽然其内部故障本身并不会产生过热，但是，由于出现故障后可改变其正常运行时的电压分布或泄漏电流，因而在设备外表面产生异常的特征性热场分布，这也为应用红外方法在线监测和诊断某些电气设备的内部故障提供了客观可能性。例如，配电型普通避雷器（FS）严重受潮时，会出现阀片水解坍塌，上部间隙组混乱，导致分布电压不均匀，间隙组或表面泄漏电流过大而出现局部温升；单元件结构的变电站型（FZ）普通避雷器和磁吹（FCZ）避雷器，当并联均压分路电阻受潮时，也会因泄漏电流增大而发热，单元件氧化锌避雷器受潮后也出现类似特征。但是，对于多元件结构的FZ和FCZ型避雷器而言，当个别元件受潮时，非故障元件分布电压和泄漏电流增加而发热，可是故障元件却因分布电压降低而相对变凉，多节串联的氧化锌避雷器受潮时也出现类似特征。另外，带有并联分路电阻的阀型避雷器，当并联分路电阻老化（阻值增大）时，也会改变其内部电压分布和发热特征。例如，对于多元件结构阀型避雷器而言，当个别电阻老化时，会因功率损耗增大而变得更热；当并联电阻整体老化时，则会因发热功率降低而整体相对变凉。根据这些温度状态特征，就能够应用红外方法诊断避雷器的受潮、并联分路电阻老化和断裂等内部故障。

除避雷器以外，对于交流输电线路绝缘子串中的绝缘阻值劣化和污秽瓷瓶而言，也因运行中其分布电压及泄漏电流异常而将出现发热或变凉的特征。例如，对于绝缘电阻值在 $9\sim 300\text{M}\Omega$ 的低值瓷瓶，顶帽温度高于相邻瓷瓶，而对于绝缘电阻值低于 $6\text{M}\Omega$ 的零值瓷瓶而言，顶帽温度将低于绝缘子串中的相邻瓷瓶。但是，对于绝缘子串中的污秽瓷瓶来讲，因瓷盘表面泄漏电流增大而发热。根据这些特征，就可以借助红外方法把绝缘子串中的低值、零值和污秽的瓷瓶检测出来。

5. 油浸电气设备缺油故障的诊断

许多油浸高压电气设备（如油断路器、耦合电容器、电流互感器、电压互感器、变压器套管与油枕等），会因漏油而造成缺油或假油位。由于油面上下介质热物性参数差异较大，在设备外表可产生与油位对应的明显温度梯度。因此，缺油故障也可用红外方法监测和诊

断。

6. 电力机械磨损故障的诊断

发电机、电动机以及其他各种电力机械因轴承振动或润滑冷却油量不足，或因安装调试不好，轴承受力不正常，引起的轴承磨损过热；直流电动机换向器因表面脏污或磨损变形引起的高温过热故障等，均可应用红外方法做出诊断。

7. 火电厂锅炉运行状态诊断

火电厂锅炉炉膛灭火或燃烧不正常，不仅导致火焰温度变化，也会引起火焰闪烁辐射分量的改变。因此，应用红外方法不仅能够监测锅炉的运行状态，同时还能够进行自动灭火保护。此外，通过监测烟温等方法，可对锅炉堵灰作出诊断。

8. 热力系统破损及漏热诊断

火电厂锅炉及输热管道保温材料性能不佳、施工不合格或破损，联合循环电厂高温节煤器或热交换器内侧保温材料劣化和损伤脱落，都可以造成严重漏热，烟囱内壁破损也会引起外壁温度分布异常，因此，可进行红外诊断。

9. 电力设备零部件内部缺陷及焊接质量诊断

有些电力设备零部件（如高压绝缘工具和绝缘拉杆、金属镀层及其他部件）和金属焊接件，在生产过程中就在其内部残存有空洞、裂纹、气隙或异质杂物等内部缺陷，一旦组装成电力设备，就给设备带来固有不可靠性（或先天性故障隐患）。此类缺陷在生产过程中或出厂前均可利用红外无损检验方法进行检验。

10. 其他诊断

除上述各类电力设备故障可采用红外诊断以外，红外监测与诊断技术还可应用于火电厂储煤堆自燃监测与预报，电厂温排水热污染监测等。

最后也应该注意到，任何一种监测技术与诊断方法都不会是万能的，因此，红外监测与故障诊断尽管在电力行业有着广泛的适用性，也必然有它的局限性，这是由红外诊断方法的原理所决定的。本章第二节已经指出，红外状态监测与故障诊断是以对设备表面进行红外扫描测温为基础的。又因为红外辐射在固体中的穿透能力极其微弱（对金属导体的穿透厚度只有 $1\mu\text{m}$ 数量级，对于大多数非导电材料透过厚度也小于 1mm ），所以，对于大型复杂电力设备内部的某些故障，假如其故障发热功率太小，或因故障部位距设备表面太远，由于热量的横向传递，使故障发热不能在设备表面产生明显的特征性响应；或者因设备内部的热交换过程特别复杂，致使内部的故障发热也无法在设备表面形成特征性热场分布。在这些情况下，红外方法就难以从设备外部监测到内部的运行技术状态（除非在设备内部相关部位装设红外光纤），因而也就难以准确地进行故障诊断。例如，当大型发电机或电动机定子铁芯齿部或槽口处的浅表片间短路时，红外诊断是十分准确有效的。但是，当铁芯内部深处出现局部短路或铁芯轭背局部短路时，则因故障区局部发热在铁芯内部的横向扩散，导致定子铁芯表面温升不显著，不同齿段之间的温度对比度也很低。因此，在这种情况下难以用红外成像方法对短路故障部位准确定位。又如，对于大型油浸变压器的一些内部故障（如线圈断线、围屏及绝缘纸间爬电、内部引线焊接不良、引线支架受潮或绝缘老化、分接开关接触不良或过渡电阻烧坏、绝缘击穿等），因变压器内部的油循环搅乱了故障发热形