

GONGDIAN SHEBEI  
HONGWAI ZHENDUAN JISHU

# 供电设备 红外诊断技术

陈永辉 蔡葵 刘勇军 等 编著  
屠强 主审



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

GONGDIAN SHEBEI

HONGWAI ZHENDUAN JISHU

# 供电设备 红外诊断技术

陈永辉 蔡葵 刘勇军 等 编著  
屠强 主审



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

目前红外检测技术在我国电力系统中已得到比较广泛的应用,并取得了显著的效果,为设备状态检修提供了依据,有效地预防了一些事故的发生,大大提高了设备运行的可靠性。本书从红外检测的工作原理谈起,结合引进的非制冷焦平面红外热像仪的实际应用,重点介绍了红外诊断技术应用概况、红外基础理论、红外诊断实例分析、红外诊断仪器介绍等内容。

本书旨在通过较为直观的红外热谱图形式,对电力设备的检测诊断技术在电力系统中的应用起到借鉴和推广作用。本书主要读者对象是科研院所和现场从事电力设备故障诊断与维护的科技工作者及设备管理人员。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

供电设备红外诊断技术 / 陈永辉等编著. —北京: 中国水利水电出版社, 2006  
ISBN 7-5084-3741-1

I. 供... II. 陈... III. 供电—电气设备—红外线检测 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 037984 号

书 名	供电设备红外诊断技术
作 者	陈永辉 蔡葵 刘勇军等 编著 屠强 主审
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a> E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a> 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京中科印刷有限公司
规 格	787mm×1092mm 16 开本 11.5 印张 273 千字
版 次	2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	42.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

## 审 委 会

主 审	屠 强				
副 主 审	李 岳	任 成	管国良	陈永辉	
委 员	刘建军	李树平	刘勇军	李字明	
	王瑞发	王忠杰	贾学东	白 铮	
	高世鹏	李兴斌	孙立成	蔡 葵	
	边久泉	李国强			

## 编 委 会

主 编	陈永辉	蔡 葵	刘勇军		
副 主 编	梁 岩	姜世金	张广义	李寿清	
	王金栋				
委 员	李德民	刘宝军	刘 敏	李 震	
	都兴全	李德成	张长依	郎宇宁	
	董阿春	田洪迅	张忠宜	程显林	
	汪恕民	胡太全	李 斌	王春芳	
	都兴周				

# 前 言

电气设备的状态检修是利用设备诊断技术，在带电状态下对电气设备进行诊断、发现缺陷所进行的预知性检修。状态检修是国内外正在大力开展的科学的检修方式，它克服了定期计划检修的盲目性，具有很高的安全性和经济价值。

开展电气设备的状态检修必须进行设备诊断，设备诊断是实施状态检修的前提。诸如绝缘在线监测、变压器色谱在线监测、变压器局部放电在线监测、瓷瓶盐密在线或离线监测、断路器性能在线监测、直流接地微机选检、红外诊断等技术，都是当前带电电气设备的诊断应用技术。

带电设备的红外诊断技术是一门新兴的学科。它是利用带电设备的致热效应，采用专用设备获取从设备表面发出的红外辐射信息，进而判断设备状况和缺陷性质的一门综合技术。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检测技术，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系统论述电力设备故障红外诊断理论与实践的科技著作很少，尤其是具体介绍电气设备的红外分析诊断实例更少。为了适应这种需要，我们组织了相关的专家编写了本书。

严格地讲，电气设备故障红外诊断学应包括诊断理论和诊断技术两大部分内容。在本书中，为了尽量做到理论与实践的完美结合，我们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的成果和大量变电站现场检测与红外诊断经验为依据，并结合有关科研部门电力设备故障红外诊断的模拟试验研究，努力实现知识体系的系统化。

本书旨在通过较为直观的红外热谱图形式，对电力设备的检测诊断技术在电力系统中的应用起到借鉴和推广作用。本书重点介绍了红外诊断技术应用概况、红外基础理论、红外诊断实例分析、红外诊断仪器介绍等内容。

在本书的编写过程中得到了许多专家和兄弟单位的大力支持及热心帮助，在此，对在本书出版过程中做出贡献和提供帮助的有关单位及各位专家、朋友一并致以诚挚的谢意！

由于编者的水平有限，同时限于红外检测诊断技术在电力系统中的应用正处于积累资料快速发展的阶段，书中难免存在不足和错误之处，敬请读者批评指正。

**编者**

2005年12月

# 目 录

## 前言

<b>第一章 概述</b> .....	1
第一节 电力设备维修体制的发展与红外诊断的提出 .....	1
第二节 电力设备红外诊断技术的发展与应用概况 .....	6
第三节 电力设备故障红外诊断技术的适用范围 .....	11
第四节 电力设备故障红外诊断的相关知识 .....	14
<b>第二章 电力设备故障红外诊断原理</b> .....	16
第一节 电力设备的主要故障模式及其机理 .....	16
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 .....	30
第四节 电力设备故障信息的红外探测原理 .....	31
<b>第三章 红外检测仪器及故障检测、诊断的基本方法</b> .....	59
第一节 红外检测仪器的发展 .....	59
第二节 红外检测仪器及红外检测基本方法 .....	60
第三节 红外测温仪的正确选择 .....	65
第四节 红外检测须知及注意事项 .....	67
第五节 电力设备故障红外诊断的基本方法 .....	69
第六节 红外诊断仪器介绍 .....	75
<b>第四章 高压电气设备故障的红外诊断实例分析</b> .....	79
第一节 高压电气设备在正常状态下的发热特征 .....	79
第二节 变压器故障的红外诊断 .....	86
第三节 高压断路器、隔离开关故障的红外诊断 .....	97
第四节 电力电容器故障的红外诊断 .....	102
第五节 互感器故障的红外诊断 .....	105
第六节 避雷器故障的红外诊断 .....	111
第七节 瓷绝缘故障的红外诊断 .....	118
第八节 载流设备故障红外诊断 .....	123
<b>第五章 提高红外检测和诊断准确性的方法</b> .....	128

第一节	影响电气设备故障红外检测准确性的因素与措施 .....	128
第二节	提高诊断准确性的技术方法 .....	134
第三节	故障诊断报告与技术管理 .....	142
<b>第六章</b>	<b>变电站设备故障红外诊断典型图谱 .....</b>	<b>145</b>
第一节	变压器故障红外诊断典型图谱 .....	145
第二节	高压断路器、隔离开关故障红外诊断典型图谱 .....	148
第三节	互感器故障红外诊断典型图谱 .....	150
第四节	避雷器故障红外诊断典型图谱 .....	153
第五节	电力电容器故障红外诊断典型图谱 .....	154
第六节	其他设备故障红外诊断典型图谱 .....	156
<b>结束语</b>	.....	<b>161</b>
<b>附录 A</b>	.....	<b>162</b>
<b>附录 B</b>	.....	<b>164</b>
<b>附录 C</b>	.....	<b>165</b>
<b>附录 D</b>	.....	<b>168</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>175</b>



## 概 述

本章扼要介绍了红外诊断技术的发展概况，并简单评述3种设备管理维修体制，在此基础上着重讨论故障红外诊断的技术特点、适用范围及红外知识体系。

### 第一节 电力设备维修体制的发展与红外诊断的提出

#### 一、引言

目前电力系统中电力设备大多采用的计划检修体制存在着严重缺陷，如临时性维修频繁、维修不足或维修过剩、盲目维修等，这使世界各国每年在电力设备维修方面耗资巨大。怎样合理安排电力设备的检修，节省检修费用、降低检修成本，同时又保证系统有较高的可靠性，对系统运行人员来说是一个重要的课题。随着传感技术、微电子、计算机软硬件和数字信号处理技术、人工神经网络、专家系统等综合智能系统在状态监测及故障诊断中的应用，使基于设备状态监测和先进诊断技术的状态检修研究得到发展，成为电力系统中的一个重要研究领域。在电力系统中推行状态检修的直接效益有：①节省大量维修费用；②延长设备使用寿命；③增加发电能力；④确保发供电可靠性；⑤降低检修成本、减少检修风险。本节主要介绍检修体制的演变和状态检修的发展概况及状态检修面临的问题。

#### 二、检修体制的演变

检修观念的演变经过2个阶段：事后检修（18世纪第一次产业革命）和预防性检修（19世纪第二次产业革命）。

##### （一）事后检修阶段

事后检修（BM, break maintenance）也称故障检修（CM, corrective maintenance），是最早的检修方式。这种检修方式以设备出现功能性故障为判断依据，在设备发生故障且无法继续运转时才进行维修。显然，这种应急维修需付出很大的代价和维修费用，不但严重威胁着设备和人身安全，而且维修不足。

##### （二）预防性检修阶段

到第二次产业革命时期，开始推行预防性检修（PM, prevention maintenance）。预防性检修经过多年的发展，根据检修的技术条件、目标的不同而出现以下7种检修方式：

### 1. 定期检修 (TBM, time based maintenance)

定期检修制度直到第二次世界大战后,才被各国陆续地从军事领域移植到民用工业。中国电力工业的定期检修制度是 20 世纪 50 年代从苏联引入的。直到 20 世纪 80 年代, TBM 仍是主流的检修制度。定期检修在保证重大机械设备正常工作中确实起到了直接防止或延迟故障的作用,但这种不根据设备的实际状况,单纯按规定的时间间隔对设备进行相当程度解体的检修方法,不可避免地会产生“过剩检修”,不但造成设备有效利用时间的损失和人力、物力、财力的浪费,甚至会引发维修故障。据统计,1996 年我国的 100、125、200MW 火电机组非计划停运与出力降低的责任原因分别有 36%、31% 和 41% 是由于这种过剩检修造成的。

### 2. 以可靠性为中心的检修 (RCM, reliability centered maintenance)

RCM 是一种以用最低的费用来实现机械设备固有可靠性水平为目标的检修方式。该检修方式能比较合理地安排大修间隔,有效预防严重故障的发生。RCM 的研究始于 20 世纪 60 年代后期,电力工业则是从 1983 年开始,并于 1984 年由美国电力研究院 (EPRI) 将其用于核电厂的检修。到 1997 年,在美国排名前 1000 家的大公司中,已有 68% 的公司采用 RCM 的检修方法。

### 3. 状态检修 (CBM, condition based maintenance) 或预知性维修 (PDM, predictive diagnostic maintenance)

这种维修方式以机械设备当前的实际工作状况为依据,通过高科技状态监测手段,识别故障的早期征兆,对故障部位、故障严重程度及发展趋势作出判断,从而确定各机件的最佳维修时机。状态检修始于 1970 年,由美国杜邦公司 I. D. Quinn 首先倡议。状态检修是当前耗费最低、技术最先进的维修制度,它为设备安全、稳定、长周期、全性能、优质运行提供了可靠的技术和管理保障。但由于状态检修需要监测的内容多、投资大,并存在一定的风险,要能熟练地运用于设备维修还需要长时间的经验积累。

### 4. 故障查找 (FF, fault find)

这种维修方式主要针对紧急备用设备,在固定的时间后启动这些设备,发现问题及时解决,以提高备用设备的可用率。

### 5. 使用至损坏再修 (RTF, run to fault)

采用该方式进行修理的设备不控制送修,通常用于对安全无直接危害的 3 类故障:①偶然故障;②无规律性故障;③故障损失小于维修费用的耗损故障。

### 6. 以寿命评估为基础的检修

认为状态检修应根据分析监控诊断资料先估计设备寿命,再确定检修项目、频度与检修内容。

### 7. 主动维修 (PM, proactive maintenance)

从经济、寿命等多种因素考虑,重点在机械故障的识别和消除、故障原因的分析,通过延长发电厂机器寿命来获得最大的效益。

## 三、状态检修技术发展概况

状态检修随着故障诊断技术的发展而逐渐进入实用化,并由于其巨大的效益而在工业界引起广泛重视,理论研究和生产实践都在进一步深入。国外在状态检修技术研究与实践

应用方面都已取得了较成功的经验。美国、德国、日本、法国都有应用这项技术的报道。与状态检修密切相关、能直接提高状态检修工作质量的理论与技术主要包括4个方面的内容,即:设备寿命管理与预测技术、设备可靠性分析技术、设备状态监测与故障诊断技术和信息管理与决策技术。

### (一) 设备寿命管理与预测技术

大多数工业化国家的电力基础设施在20世纪60年代与70年代间得到极大扩充。由于多数电力主设备的在役时间在25~30年左右,因此目前进入老化阶段的设备所占份额愈来愈大。这种情况迫使各电力公司考虑如何延长机组寿命并保证效益。状态检修中寿命预测与评估技术的应用,有利于科学合理地安排检修和提高设备的可用率。但电力公司可能获得的效益大部分来自于电厂主设备,因此,各国都把寿命预测和评估研究的重点放在对锅炉、汽轮机、发电机、变压器及高压开关等重要设备上。

#### 1. 锅炉方面

日本是近10年来对火电厂锅炉部件剩余寿命研究最多的国家。他们采用了3种有代表性的寿命诊断技术:应力解析法、破坏试验法、非破坏损伤计测法。其中,应力解析法能评价任意部位的材料,但若运行历史或材料数据不准确,将会导致计算误差,且没有考虑材料老化这一因素。破坏试验法比其他方法计测损伤的精度高,但对不能取样的部位不适用。为此,日本研究出微小试样法、复型金相法、巴克好森噪声法、超声波噪声分析法等非破坏性损伤计测法。这些方法可以在部件材料损伤进展的同时,非破坏性地检验材料的金属组织物理性能的变化。美国电力研究院(EPRI)监测诊断中心(M&D)也研究出用于锅炉诊断系统的寿命管理分析软件。

#### 2. 汽轮机、发电机方面

对汽轮机、发电机进行状态检修时必须重点考虑汽轮机轴瓦、叶片和发电机定子、转子、轴系等部件。目前,美国电力研究院(EPRI)监测诊断中心(M&D)已研制出用于汽轮机诊断系统的叶片寿命动态分析系统(BLADE)和用于发电机诊断系统的转子裂纹评价系统(SAFER),可以计算、推测叶片何处可能出现裂纹及产生裂纹后的寿命,并帮助工程技术人员评估汽轮机、发电机转子的剩余寿命及随运行时间的故障发生概率。华中理工大学也提出了汽轮机转子的在线寿命管理系统框架,并研制了200MW汽轮发电机寿命管理及故障诊断专家系统。对于转子寿命评估的方法,国内已有较为成熟的理论。

对于汽轮发电机的定子,俄罗斯的科研工作者在总结了俄罗斯11个不同电厂运行经验的基础上,制订了延长汽轮发电机定子使用寿命的主要原则和依据。罗马尼亚则成功研制了一套用于75MW汽轮发电机监视诊断、数据记录及在线预测系统,其中在线预测部分主要完成对定子绕组绝缘剩余寿命和轴系剩余寿命的评估。

在轴系方面,我国的寿命预测与评估技术有一定成果。上海交通大学电力系采用自己开发的MAN-DISP程序,对电气扰动下电力系统的暂态过程进行仿真并得出轴系的动态扭转力矩,成功地评价了电网扰动对300MW汽轮发电机组轴系疲劳寿命的影响。同样,华北电力大学也对国产运行近30年的50MW汽轮机—发电机进行了扭振特性及其疲劳寿命研究,采用了集中参数的机组轴系扭振分析模型,以现场事故情况为依据,模拟计算了几种典型事故大轴联轴结处轴颈和螺栓的应力应变历程及疲劳寿命损耗,对该机组的

剩余寿命能够较恰当地进行评估。

### 3. 变压器方面

变压器剩余寿命的评估是当今监测与诊断工作的重要内容之一。现有的大多数估计变压器寿命方法，仅简单考虑负荷、温度、绝缘材料的现状，由于变压器遭受到的短路次数、过电压次数、设计弱点、修理和现场运输等因素都会影响变压器发挥功能的能力。要正确估算变压器的寿命，必须获得有关运行状况和历史信息，需要对变压器技术情况有更深入的了解。研究及实验表明，变压器很少由于技术性或使用寿命的原因退出运行，而主要受经济寿命的限制。因此，ABB公司和欧洲一些重要电力部门为避免对剩余寿命进行定量评估，开发了一种变压器排列等级方法，为变压器的寿命评估做了大量工作。

### 4. 开关方面

高压断路器在电力系统中担负着控制和保护的双重任务，由于它关系着系统的安全运行以及检修工作量的大小，其电寿命始终为用户所关心。目前，国内已经提出根据触头和喷口在开断时的质量损耗和电弧能量计算电寿命的两种方法。但由于开关动作分散性很大，开关开断电流的大小与电磨损量是非线性关系的，因而在寿命累计时需进行加权处理。

## (二) 电力设备的可靠性技术

可靠性技术是一门在 20 世纪 40 年代开始于美国的专业技术，其后前苏联提出了可靠性与维修性理论和统计方法。所谓可靠性，一般认为是机械设备和元件等在规定的条件下和预定的时间内完成规定功能的能力。设备可靠性通常用可靠度函数  $R(t)$  来定量描述。定义  $F(t)$  为不可靠度函数，它是产品在时间  $t$  内发生故障的概率，则有

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

可靠度函数定义为

$$R(t) = 1 - F(x) = \int_0^{\infty} f(x) dx \quad (1-2)$$

式中： $f(x)$  为故障密度函数。

传统的电力设备可靠性评估基于威布尔得出的浴盆曲线 (bathtub curve) 法。由于可靠性特征曲线形似浴盆而得名，如图 1-1 所示。但此法只适用于对有支配性耗损故障的设备进行维修，且精确度不高。为此，华北电力大学将可靠性预测理论和强度及寿命理论结合起来，综合考虑影响锅炉部件故障的各种因素，对预测锅炉部件的可靠性做了有益的尝试，还运用多元统计方法中因子分析和聚类分析，从反映火电大机组运行可靠性的指标体系出发，对我国火电 100MW 及以上机组的运行可靠性进行了分析，提出了企业综合可靠性水平的评估方法。用这种方法可以简单分析我国不同地区火电大机组运行的可靠性水平。

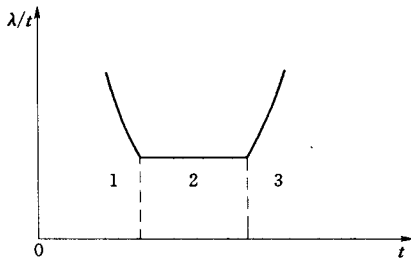


图 1-1 典型“浴盆曲线”图

1—早期故障期；2—偶然故障期；  
3—耗损故障期

### (三) 设备状态监测与故障诊断技术

设备状态监测是故障在线诊断和离线分析的基础。从国内情况看,汽轮机等大型旋转机械的状态监测技术已经达到相当高的水平,我国科技工作者已开发出了一系列状态监测系统,并成功地应用于生产实践中。另外,发电机状态监测的技术手段也已很成熟,只是在实际应用时,如何准确判断电机状态,还需要进一步的工作经验积累。从国外来看,美国电力研究院(EPRI)下属的监测诊断中心(M&D)利用40多项先进的测量技术和分析软件,对美国50家最大的电力公司的电厂、电网中80%的设备进行了在线监测和故障分析,了解设备的运行状况和健康水平,并据此制订设备维护和检修计划。加拿大魁北克水电公司也开发了一种在线状态监视系统,使机组维修和专业技术人员不停机就能了解水电机组的状态。关于开关的状态检修及故障诊断,由于其故障机理较为清楚,故障诊断原理与方法比较成熟,国内已研究出检测装置和检测方法。对于绝缘及电气参数的劣化与开关故障,机械参数与物理参数的诊断都已有较为成熟的理论。从20世纪70年代初至今,故障诊断技术的研究已经由单一地偏重故障机理与诊断方法的研究发展到故障诊断专家系统的研制开发。迄今为止,国内外现有的专家系统尚不能对机组振动故障进行自动诊断,还依赖于有经验的专家进行判断,其主要原因是由于这些专家系统所包含的知识还不足以全面反映振动故障的征兆与其原因之间的映射关系。

### (四) 信息管理与决策技术

近30年来,管理决策作为一门独立学科,有了很大发展。状态检修作为一种先进的检修体制,是与多方面的管理工作分不开的。图1-2为状态检修的一个简化决策流程。世界各国从不同的管理目标出发,形成了不同的管理系统。芬兰的IVO输电服务公司开发的变电站检修管理系统(SOFIA)是建立在对一座变电站的长期检修计划的基础上,从寿命周期费用(life cycle cost)

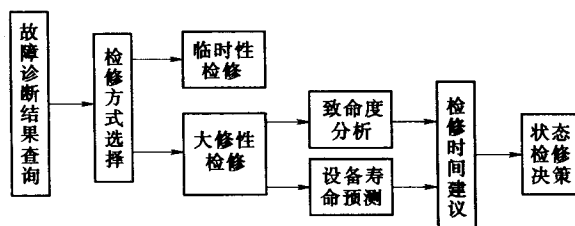


图 1-2 状态检修简化决策流程

着手,使用设备的劣化模型的数学形式(状态模型)来估计设备将来状态的一种检修管理系统。SOFIA在考虑预算及其设备状态的情况下,通过检修费用的优选来降低总费用。荷兰B. V. KEMA与荷兰Delft技术大学在考虑市场情况及技术条件的前提下,研制了一种包括状态检修在内的多种策略均衡应用的main man检修管理系统,其特点在于引入了诊断专家系统,使可靠性和安全性达到可接受的水平。德国提出将工人或供货商的管理层所有功能融为一体,以减少中间环节的瘦型管理方法。此管理方法在德国的Weisweiler电厂检修管理中得到运用,使该厂48%的工作任务流程得到优化,效果明显。

通过上述讨论,状态检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) 由于状态检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故。

(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和其他工业以及学术界，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技术得到了足够的重视和肯定。

## 第二节 电力设备红外诊断技术的发展与应用概况

### 一、电力设备故障红外诊断技术的发展概况

红外诊断技术因其所依据的非接触式红外测温及其在电力设备故障诊断应用中的诱人技术特点而早已被人们认识，然而直到今天才被广泛推广应用，它是伴随红外探测技术、红外诊断仪器和微型计算机的日臻完善而发展起来的。

在国外，早在 1949 年 Leslie 等人就首次提出利用红外技术探测高压输电线路过热接头的思想，并描述了利用电阻测辐射热计制成的红外辐射计探测过热接头的具体方法。此后，1952 年 Sandiford 提出，利用光线通过有故障接头上方的受热空气产生无规则折射的方法，以固定在三角架上的 10 倍望远镜和适当的背景物体，通过热空气观测背景前的物体，从而发现超过环境温度  $50^{\circ}\text{C}$  的热接头。尽管当时认为这是开辟了利用红外辐射探测高压输电线路过热接头的简便方法，但是因 Sandiford 的方法存在一系列缺点，所以没有得到进一步发展与推广。随着红外探测元器件和仪器系统的发展，1965 年开始应用较先进的红外辐射测温仪测量工业设备及输热管道温度，检测电动机、变压器和电缆等设备过热接头。从此，正式开辟了应用红外测温仪器检测电力设备热故障的新领域，并在此基础上不断改进和完善红外检测仪器，扩大使用范围，逐步提高在实际中的使用效果。

除了使用红外辐射测温仪探测高压输电线路过热接头以外，20 世纪 60 年代初还研制了利用蒸发照相原理工作的红外成像仪。该仪器可以探测 300K 背景上的 1K 温差，并用于检测炉壁因腐蚀而变薄的故障部位及输电线路过热接头，迈出了红外成像探测的第一步。然而，这种红外成像检测仪器在工作原理、结构、性能和实用性上都存在许多问题，因此，随着红外行扫描器和军用光机扫描式红外前视系统的迅速发展及逐步完善，很快诞生了民用光机扫描式红外热成像仪，并且立刻取代了按蒸发照相原理工作的红外成像仪。接着，一些国家迅速把红外热像仪用于电力设备众多裸露电气接头及各种高压电气设备故障的检测和输热管道漏热检测。前苏联为诊断大型汽轮发电机生产、维修和使用过程中出

现的定子质量缺陷,在20世纪70年代专门研制出定子探伤红外诊断仪。与此同时,一些国家先后建立健全了生产性红外诊断标准或故障设备判废标准。此外,在火电厂锅炉燃烧状态监测与控制、热能动力设备状态监测、热损耗分析、隔热保温检测等方面,也都开展了试验工作,都取得了良好的技术经济效益。

在电力设备故障红外诊断的实施方法上,有的使用结构简单的红外辐射测温仪、便携式红外热电视或热像仪,在现场单人操作;有的把较复杂的扫描红外热像仪或红外热电视装在面包车上进行检测。为了进一步提高探测高压输电线路中热接头和劣化绝缘子的检测效率,并克服地理环境障碍,从20世纪60年代中期开始,一些技术发达国家的许多电力公司,先后把红外热像仪装在直升飞机上,对高压输电线路故障作巡线检测,也取得了良好的技术经济效益。

我国电力设备故障红外诊断的研究试验起步较晚,但近几年发展很快。国内电力设备故障红外诊断的发展大体可归纳为如下几个阶段。

### (一) 第一阶段

第一阶段(1986年以前)为调查研究、基础研究和可行性试验阶段。早在20世纪60年代前半期,国内一些电力研究所就力图开展红外诊断研究,并进行了广泛的调查研究工作,但由于种种原因,花费近10年的时间也未取得明显进展。随着国内红外技术的发展,20世纪70年代中期,前东北电力技改局电网调度研究所和华东电管局电力中心试验研究所等单位,进行了适用于电力设备故障监测的红外辐射测温仪的研制工作,并着手进行了电力设备热故障的检测试验。与此同时,原水电部西安热工研究所等单位,开始了光机扫描式红外热像仪的研制和输电线路劣化绝缘子的红外监测试验研究,都取得了良好效果,及时发现和排除了不少事故隐患,有效地防止了一些重大事故的发生。一些高等院校也进行了某些基础研究工作。这个阶段的主要特点是使用的检测仪器以红外辐射测温仪为主,检测的对象以外部裸露的电气接头过热故障为主。典型的事例是:1975年,谏泰跨越长江线路2号导线突然断线坠江,为弄清事故原因,在启用备用的4号导线代替2号导线供电后,原华东电管局电力中心试验研究所使用红外测温仪进行带电测温,发现南耐张塔1号导线5个绑扎结温度普遍偏高,尤其与2号导线断线位置相应的第一绑扎结温度高达165℃。通过进一步测量环形线夹、阻尼线和导线的温度分布,发现阻尼线温度高于导线温度。实测还发现阻尼线上通过的电流比通过导线的电流大2.5倍左右。因导线、阻尼线和前后两个绑扎结形成闭合回路,在交变电磁场的作用下在回路中产生环流,改变了阻尼线与导线之间的分流状况,使大部分电流经绑扎结流入阻尼线。而绑扎结接触不良,又流入较大电流,致使绑扎结温度很高,降低了导线机械强度,并使导线首先在第一绑扎结处产生塑性变形,最后导致导线拉断坠江。这样,不仅通过检测1号导线温度分布找到了2号导线断线坠江的事故原因,而且通过改进绑扎结,还防止了1号导线重演类似事故。

### (二) 第二阶段

第二阶段(1987~1991年)为航测试验阶段。这个阶段的特点是:为改善电力设备故障红外诊断的技术装备条件,首先在几个电力中试所开始引进国外较先进的红外热像仪,主要检测对象除仍以电气设备外部裸露接头热故障为主以外,着重对高压输电线路导线连接件及劣化线路绝缘子进行直升飞机红外航测试验研究,并取得了不少成功的经验。

除此以外,对高压电气设备内部故障的监测也做了一些工作。国内专业红外科研单位积极进行光机扫描红外热像仪和红外热电视的研制,并有多种样机通过有关部门的鉴定。

### (三) 第三阶段

第三阶段(1992~1995年)为生产性试验阶段。这个阶段的特点是:第一,除专业电力科研单位以外,有些生产单位(供电局)看到了红外诊断的技术潜力,开始购置仪器进行现场生产性检测试验;第二,原电力工业部西安热工研究院和一些省电力中试所,把以往只对电气设备外部裸露接头故障诊断的研究,扩展到对各类高压电气设备内部故障诊断的研究,通过理论分析、模拟试验和大量现场监测结果的统计分析,搞清了各类电气设备内部故障的红外热像特征,为在生产实践中推广红外诊断技术奠定了可靠的基础;第三,在检测手段上,更多地购置了先进的红外热像仪,同时,国产红外热电视也开始试用,并在基层单位取得一席之地。

### (四) 第四阶段

第四阶段(1996年开始至今)为应用、推广和建立诊断标准阶段。这个阶段的重要特点是得到了各级领导的重视,行业主管部门开始以行政手段推广应用红外诊断技术,各网省局普遍投资购置红外诊断仪器,并着手制订电力设备故障红外诊断的行业标准——《带电设备红外诊断技术应用导则》,力图规范高压电气设备故障红外诊断中的监测方法与故障判断依据。

必须清醒地看到,红外诊断技术在我国电力行业的发展虽然取得了可喜的进步,在实践中获得了明显的技术经济效益,提高了设备可靠性,降低了故障率和重大事故发生率。但是,如果从设备诊断工程学的高度来评价当今的电力设备故障红外诊断技术水平,应该说还是处在经验层次的初级阶段。因此,为了促进红外诊断新技术在电力行业的迅速推广、应用和健康发展,除了要进一步拓宽应用领域和扩大适用范围的研究以外,更应该在提高诊断技术水平上做更多的工作。为此,今后还应该在以下几个方面开展更多、更扎实的研究工作:

(1) 诊断标准化的研究。由于电力设备运行状态和故障的红外在线监测结果将受到运行工况(如负荷率)、检测条件(如检测距离、方位、环境温度、湿度、风力、风向和背景辐射等环境条件因素)的严重影响,如果不把在任意条件下检测的结果进行标准化处理,那么对于给定的某种设备故障,将会得到不同的诊断结论。尽管某些先进的红外热像仪都增设了测试距离和大气衰减等修正功能,但其修正的可靠性和精确程度往往是有限的。因此,为了保障诊断结果的科学性和惟一性,应该研究红外监测结果的标准化处理方法。只有这样,才有可能真正做到诊断标准化和结果的惟一化。

(2) 诊断数学的研究。诊断数学是研究诊断信息的选择、采集、处理和判断的数学原理与方法。要想把电力设备故障的红外诊断以及故障判定方法从现在的经验层次提高到理论层次的水平,必须针对电力设备故障红外诊断的具体特点,认真研究故障信息的数学处理方法。

(3) 诊断智能化研究。为了克服目前电力设备故障红外诊断中对故障判定的人为性和经验性影响,应该深入开展红外诊断中的模式识别等逻辑诊断方法的研究,以便实现故障判别的人工智能化。虽然已经有人研制了高压电气设备故障红外成像诊断专家系统软件,



但是,该软件设计基础还仅仅是已知设备故障的典型红外图谱,而且其数据文件尚未进行标准化处理。因此,以此为前提的推理和结论,仍然摆脱不掉诊断的人为性和经验性,因此这方面的研究工作应进一步深入开展。

## 二、电力设备红外诊断技术应用概况

由于社会经济的进一步发展,使得对供电可靠性的要求越来越高。随着电力生产技术的进步,电网运行电压不断增高。随着电网的增大,机组容量增大,输电距离加长,设备的密封性和组合性也在不断加强。目前,设备事故在全部事故中占的比率最高,有的高达92%。而电力工业的生产设备,如锅炉、发电机、输变电各设备等都分别在高温度、高压、高速旋转、高电压、大电流的状态下运行,都与热有着极其密切的关系。在众多的停电事故中,因设备局部过热引起的停电检修时有发生,如某电厂在1987年由于某台隔离刀闸的一个引线接头过热烧断,断线在不平衡力的作用下,向其两侧抽动,连续造成相间短路,致使大面积停电。这样一个小小的过热接头造成了极大的经济损失,足见过热的危险性。因此,对电力设备温度的监测管理是国内外一直进行的工作,而监测温度的老办法不外乎是“接触式”的,不论应用水银温度计、热电偶或蜡片,都要与被测设备良好接触方可进行测量,带电的、高速转动的和处在高空部位的设备,除有预埋测温元件外,都必须进行停电、停机或登高爬上设备方可进行测量,这为发供电的经济性和安全性带来极大的困难。众所周知,电力系统的设备接头数量惊人,为保证其质量,过去通常采用两种方法检测,即“测直阻法”和“贴温度标签法”。测直阻法是使用电桥或数字微欧表测量接头电阻,工作量大,耗时费力,尚需停电才能进行。贴温度标签的办法各国均有采用,如日本温度标签可分为10种,温度范围为50~125℃,寿命为2~3年。我国不少供电部门也采用蜡片贴附测温,这些测温片虽然比较简单,但都需要停电后安放,费时间、不经济,且测温范围狭窄,结果不准确,操作不方便、不安全,随着电压等级的提高,设备绝缘距离加大,在更高电压、更远距离的设备上,根本无法使用温度标签的方法测温。

基于以上所述,电力设备的温度监测必须改变测温的接触方式,寻找新途径,开展遥感遥测技术,在不接触运行设备的前提下,进行不停电、不停机的测温。而发展到目前的非接触红外测温技术,恰好满足了电力系统的要求,红外测温正在世界很多国家的电力生产中发挥着重要的作用。

### (一) 电力红外诊断技术在国内应用概况

我国电力热成像检测技术始于20世纪80年代初,红外检测在发、输、变电的各个方面应用都很有成效,越来越引起更多同行的关注,除试验研究部门外,生产运行部门也积极投入到红外检测的行列当中。

在发电方面,热成像仪用于检测锅炉和汽机的绝热状况,检测发电机定子铁芯的绝缘、定子线棒的焊接质量及滑环、碳刷等。除使用热像仪外,有的国家还备有检测大型定子铁芯的专用装置。过去定子铁芯绝缘采用手摸的办法检查短路过热点,用热成像监测方法,其准确迅速的程是用手摸所不能比拟的,对于在高速旋转中且通过上千安培电流的滑环与碳刷,红外测温更是提供了方便安全的检测。我国正在开展发电设备红外检测诊断的试验研究,同时进行大量现场检测,均取得十分显著的成效。

红外检测在变电方面应用最广泛,不少国家已形成常规的检测制度,设置热成像仪专