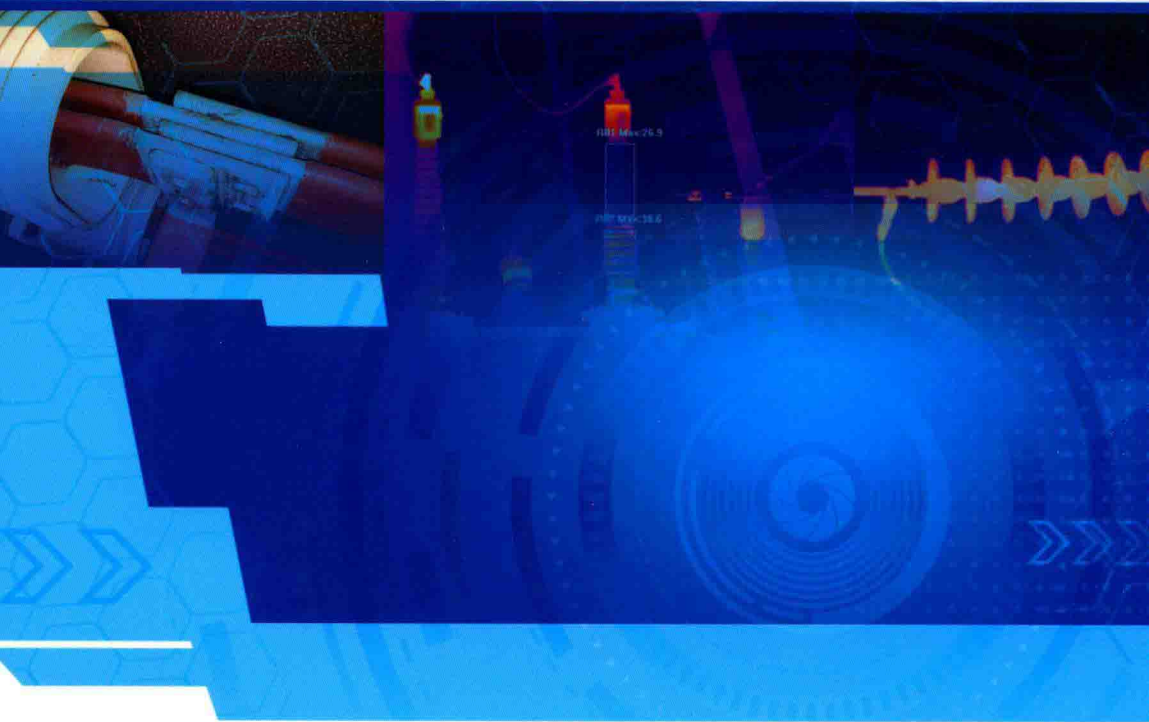


DIANLI SHEBEI
DAIDIAN JIANCE JISHU
JI YINGYONG

周求宽 刘明军 刘 衍 等编著

电力设备 带电检测技术及应用

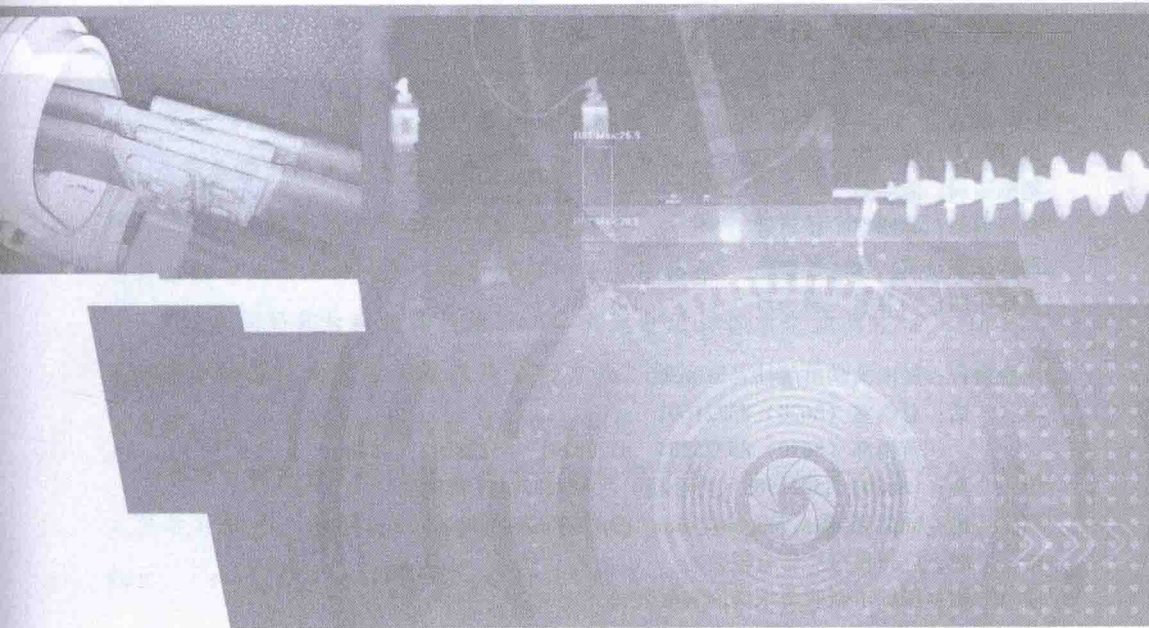


暨南大学出版社
JINAN UNIVERSITY PRESS

DIANLI SHEBEI
DAIDIAN JIANCE JISHU
JI YINGYONG

周求宽 刘明军 刘 衍 等编著

电力设备 带电检测技术及应用



暨南大学出版社
JINAN UNIVERSITY PRESS

中国·广州

图书在版编目 (CIP) 数据

电力设备带电检测技术及应用/周求宽, 刘明军, 刘衍等编著. —广州: 暨南大学出版社, 2017. 1

ISBN 978 - 7 - 5668 - 1926 - 0

I. ①电… II. ①周… ②刘… ③刘… III. ①电力设备—带电测量 IV. ①TM4
②TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 208685 号

电力设备带电检测技术及应用

DIANLI SHEBEI DAIDIAN JIANCE JISHU JI YINGYONG

编著者: 周求宽 刘明军 刘 衍 等

.....

出 版 人: 徐义雄

策划编辑: 陈绪泉

责任编辑: 陈绪泉 崔思远

责任校对: 黄 颖 邓丽藤

责任印制: 汤慧君 周一丹

出版发行: 暨南大学出版社 (510630)

电 话: 总编室 (8620) 85221601

营销部 (8620) 85225284 85228291 85228292 (邮购)

传 真: (8620) 85221583 (办公室) 85223774 (营销部)

网 址: <http://www.jnupress.com> <http://press.jnu.edu.cn>

排 版: 广州良弓广告有限公司

印 刷: 深圳市新联美术印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 17

字 数: 342 千

版 次: 2017 年 1 月第 1 版

印 次: 2017 年 1 月第 1 次

定 价: 78.00 元

(暨大版图书如有印装质量问题, 请与出版社总编室联系调换)

参与编写人员

周求宽	刘明军	刘 衍	李唐兵
林福海	王 鹏	康 琛	贾璐路
陈 田	邹建章	刘玉婷	

前 言

电力设备带电检测一般采用便携式检测设备，在运行状态下，对设备状态量进行现场检测，从而对被检测电力设备的健康状况进行科学诊断。其检测方式为带电短时间内检测，有别于长期连续的在线监测。现场实践表明，电力设备带电检测是发现设备潜伏性运行隐患的有效手段，是电力设备安全、稳定运行的重要保障。与传统巡检和停电试验相比，带电检测在发现电力设备运行隐患方面具有显著优势，目前已成为支撑电力设备状态评价的重要技术手段之一。

为提高电力设备带电检测技术人员学习的系统性和针对性，确保带电检测工作规范、扎实、有效开展，在对国内外文献进行总结梳理的基础上，结合江西电网近年来的带电检测案例，国网江西省电力科学研究院组织编写了《电力设备带电检测技术及应用》一书。全书包括八章，分别为“红外热像检测技术”“六氟化硫气体红外成像检漏技术”“紫外光谱成像检测技术”“避雷器泄漏电流检测技术”“油中溶解气体分析技术”“超声波局部放电检测技术”“特高频局部放电检测技术”“暂态地电压局部放电检测技术”，介绍了八种带电检测技术的基本原理及诊断方法，结合江西电网的带电检测成功应用案例，分析了各类带电检测技术的适用性。

本书可供电力工程技术人员学习及培训使用，也可供大专院校相关专业人员学习参考。由于时间仓促，书中难免有疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

2016年10月

前言

1

第一章 红外热像检测技术

1

- 第一节 红外热像检测技术概述 / 1
- 第二节 红外热像检测基本原理 / 4
- 第三节 电力设备红外热像检测及诊断方法 / 11
- 第四节 典型应用分析 / 24

第二章 六氟化硫气体红外成像检漏技术

33

- 第一节 六氟化硫气体泄漏检测技术概述 / 33
- 第二节 六氟化硫气体泄漏检测技术基本原理 / 35
- 第三节 泄漏检测步骤、关键点分析及诊断标准 / 41
- 第四节 典型应用分析 / 43

第三章 紫外光谱成像检测技术

67

- 第一节 紫外光谱成像检测技术概述 / 67
- 第二节 紫外光谱成像检测基本原理 / 70
- 第三节 紫外光谱成像检测及诊断方法 / 78
- 第四节 典型应用分析 / 80

第四章 避雷器泄漏电流检测技术

84

- 第一节 避雷器泄漏电流检测技术概述 / 84
- 第二节 避雷器泄漏电流检测基本原理 / 88
- 第三节 避雷器泄漏电流检测及诊断方法 / 96
- 第四节 典型应用分析 / 100

第五章 油中溶解气体分析技术

120

- 第一节 油中溶解气体分析原理 / 120
- 第二节 油中溶解气体分析样品处理 / 124
- 第三节 绝缘油中溶解气体检测 / 127
- 第四节 充油电气设备内部故障诊断技术 / 133
- 第五节 典型应用分析 / 150

第六章 超声波局部放电检测技术

154

- 第一节 超声波局部放电检测技术基本原理 / 154
- 第二节 超声波局部放电检测及诊断方法 / 156
- 第三节 典型应用分析 / 165

第七章 特高频局部放电检测技术

190

- 第一节 特高频局部放电检测技术概述 / 190
- 第二节 特高频局部放电检测技术基本原理 / 192
- 第三节 特高频局部放电检测及诊断方法 / 206
- 第四节 典型应用分析 / 217

第八章 暂态地电压局部放电检测技术

238

- 第一节 高压开关柜基础 / 239
- 第二节 局部放电的基本知识及其检测技术 / 243
- 第三节 暂态地电压局部放电检测技术原理 / 246
- 第四节 暂态地电压局部放电检测数据的分析 / 253
- 第五节 暂态地电压现场测试工作规范 / 258
- 第六节 典型应用分析 / 261

第一章

红外热像检测技术

第一节 红外热像检测技术概述

一、红外技术发展历程

1800年，英国人 William Herschel 在可见光谱红光以外的区域，发现有显著的热作用存在。后来用特殊的感光底片拍摄光谱，证实在红光区域外侧的确有“热像”存在，称为“红外线”，也就是“红外辐射”。

但是由于技术上的困难，对红外辐射的认识一直停留在初级阶段，直到20世纪中期，由于军事、科学和工业上的需要才形成了红外物理这一专门学科，大大地提高了人们对红外辐射的产生、物体红外辐射特性的规律、红外辐射与物质的相互作用、红外辐射的传输及探测等问题的认识，为红外理论的实际应用打下了良好的基础。

红外技术最初应用于军事方面。红外前视系统（Forward-Looking Infrared System）的研究和在战场上的应用，大大加快了红外光学系统和红外探测器的设计与生产，使红外理论研究跨入了军备生产领域，并且形成了以红外装置设计、红外器件生产和红外产品开发应用为主要内容的红外技术。

应用红外物理理论和红外技术成果对设备热状态进行检测，首先是从电力工业开始的。20世纪60年代中期，瑞典国家电力局和阿格（AGA）公司合作把红外前视系统加以改进，并用于对运行电力设备热状态的诊断，开发出第一台工业用的红外热像仪。与此同时，各种各样用于设备热状态诊断的红外测温装置也相继出现。这些红外测温产品不仅可以进行温度测量，更重要的是应用于设备热状态检测。20世纪70年代，红外检测技术又引进了军事领域中夜视装备的开发成果，出现了以电子扫描和热电偶测为基础的红外热电视。

目前，红外检测技术与电子计算机技术、图像处理技术相结合，系统通过与可见光组成的多功能传感器，配用多功能目标捕捉处理器以及信息处理技术，对目标实现高速、自动、可靠的探测、识别、测距、定位、跟踪及故障诊断。

二、技术特点

(一) 技术优势

1. 灵敏度高

现代红外探测器对红外辐射的检测灵敏度很高，因此以这类探测器为基础构成的红外热像仪器对温度也具有很高的分辨率，如使用红外诊断仪器可以发现设备有 0.1°C 的温度差别。

2. 诊断效率高

由于红外探测器的响应速度可以高达纳秒级，因此可以迅速采集、处理和显示设备的红外辐射，大大提高对设备诊断的效率。

3. 可以与计算机联合工作

新型的红外诊断仪器输出的设备热状态信息，大都是经过处理的数字化信息，或者仪器本身包含微型计算机。因此，红外诊断技术在使用现有的计算机图像处理技术成果的基础上大大扩展了其功能和应用范围。

(二) 技术缺点

1. 确定温度值困难

使用红外诊断技术可以诊断出设备热状态的微小差异和细微变化，但是很难准确地测定设备上某一点的温度值。其根本原因是设备的红外辐射除与设备温度有关外，还受其他许多因素的影响，特别是设备表面状况的影响。所以，如要精准地确定设备温度值，单纯使用红外诊断技术是不够的。

2. 难以确定设备内部的热状态

设备的红外辐射主要是设备表面的红外辐射，主要反映设备表面的热状态，而不能直接反映出设备内部的热状态。所以，如果不使用红外光纤或窗口作为红外辐射传输途径，红外诊断技术通常就只能直接诊断出设备暴露于大气中的部分的过热故障或热状态异常。

三、应用情况

早在 20 世纪 80 年代，国外已将红外热成像技术广泛应用于电力设备的故障检测及飞机巡线，而且成立了专门的协会、学会以及专门的检测机构，并从事红外诊断的有偿服务。

我国电力设备热成像检测技术始于 20 世纪 80 年代初，红外检测在发、输、变电等各个方面的应用都很有成效。除试验研究部门外，生产运行部门也积极投入到研究应用红外检测的行列当中。

我国已经开展了大量的电力设备红外检测诊断试验研究，进行了大量现场检测，取得了十分显著的成效。与此同时，这些部门正在探索一套对电力生产行之有效的红外诊断技术，且已经制定了电力红外诊断技术规范。然而，必须清醒地认识到，虽然红外诊断技术在我国电力行业的发展取得了可喜的

进步,但如果从设备诊断工程学的角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。

为了促进红外检测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以外,还应该在提高诊断技术水平方面做更多的工作。因此,今后还应该在以下三个方面开展更多、更扎实的研究工作。

(一) 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,如果不把在各种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,为了保证诊断结果的科学性和唯一性,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唯一化。

(二) 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,就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。

(三) 诊断智能化研究

为了消除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,以便实现故障诊断的智能化。

四、仪器介绍

红外热像仪是当今红外检测与诊断技术所应用的最先进的仪器,分为光机扫描红外热像仪和焦平面数字式红外热像仪两大类。近几年焦平面数字式红外热像仪发展迅速,克服了光机扫描系统的复杂性和不可靠性,有逐步取代光机扫描红外热像仪的趋势。

按照使用方式的不同,红外热像仪可分为以下四类:

- (1) 手持式红外热像仪:主要用于日常巡检和精确测温。
- (2) 固定式红外热像仪:主要应用于无人值守变电站,以红外热成像监测和可见光视频报警为主。
- (3) 机载吊舱式红外热像仪:主要应用于城市配网和线路巡检。
- (4) 机器人红外热像仪:集机电一体化、多传感器融合技术、机器人视觉技术、红外检测技术于一体的智能系统。

第二节 红外热像检测基本原理

一、红外线的基本知识

(一) 红外辐射

通常把波长大于 $0.75\mu\text{m}$ 、小于 $1\,000\mu\text{m}$ 的这一段电磁波称作“红外线”，也称为“红外辐射”。

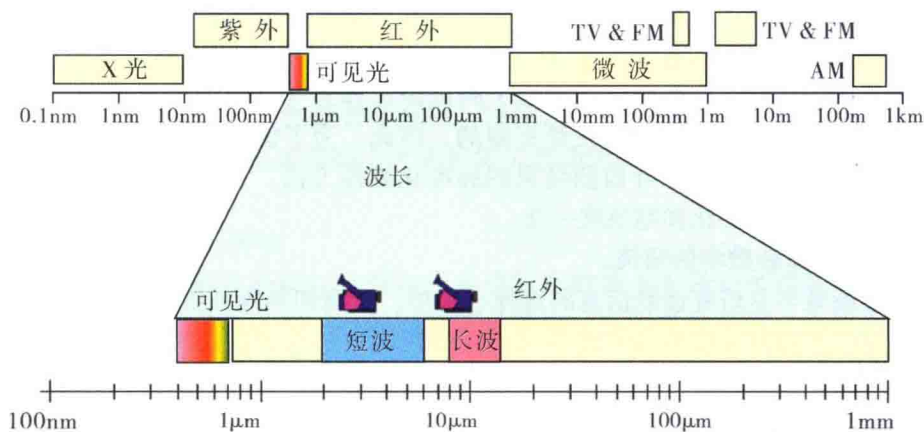


图 1-1 电磁辐射频谱图

红外辐射是自然界存在的一种最为广泛的电磁波辐射。自然界一切绝对温度高于绝对零度的物体，不停地辐射出红外线，辐射出的红外线带有物体的温度特征信息，这就是利用红外技术探测物体温度高低和温度场分布的理论依据和客观基础。

(二) 黑体

实验表明，物体表面的材质不同，则其红外辐射或吸收的能力也不同。如果有一个理想的物体，它对红外线的辐射率、吸收率与红外线的波长都无关，且等于 1（即全部吸收或全部辐射），那么这种理想的辐射体和理想的吸收体称为黑体。

黑体是一个理想的辐射体，真正的黑体并不存在。黑体 100% 吸收所有的入射辐射，也就是说，它既不反射也不穿透任何辐射，黑体 100% 辐射自身的能量。

(三) 辐射率

在理论研究和工程实践中，常用物体的辐射率（或称为发射率）来定量地描述物体辐射的能力，它等于物体的实际辐射强度和同温度下黑体辐射强度之比值，常用符号 ε 表示。

$$\varepsilon = \frac{I}{I_b} \quad (1-1)$$

式中： I ——物体辐射强度；

I_b ——黑体辐射强度；

ε ——物体的辐射率。

很明显，实际物体的辐射率一般都小于1，但是有些物体的辐射率很接近1，如石墨粗糙的表面及黑色的漆面等；而另一些物体的辐射率却很小，如抛光的铝表面，其辐射率仅为0.05。

影响物体辐射率的因素很多，如红外线波长，物体的厚度，物体表面的温度、粗糙度、平整度、颜色等。



图1-2 可见光与红外图像

图中茶壶装满热水，尽管两部分的温度相同，但茶壶右边玻璃的表面辐射率比左边不锈钢的高，这也意味着物体右边的散热效率要比左边的高。如果用红外热像仪观看，右边看上去要比左边热。

一般来说，物体吸收外界辐射的能力与物体辐射自身能量的能力相等，即 $\alpha = \varepsilon$ 。也就是说，如果一个物体吸收辐射的能力强，那么它辐射自身能量的能力就强，反之亦然。所以，一个不透明的差的吸收体既是一个好的反射体，同时也是一个差的辐射体。

（四）物体红外辐射的基本规律

1. 基尔霍夫定律

德国的物理学家基尔霍夫根据大量的实验资料总结出一条有关物体热辐射的定律：当几个物体处于同一温度时，各物体辐射红外线的的能力正比于其本身吸收红外线的的能力，并且任何一个物体的红外辐射能量密度可用下面的公式来表示：

$$\omega_{\lambda} = \alpha \omega_b \quad (1-2)$$

式中： ω_{λ} ——物体在单位时间内红外辐射的能量密度；

ω_b ——黑体在同一温度下单位时间内红外辐射的能量密度；

α ——物体红外的吸收系数，它总是小于1。

2. 普朗克辐射定律

普朗克辐射定律是描述温度、波长和辐射功率之间的关系，是所有定量计算红外辐射的基础。一个绝对温度为 $T(K)$ 的黑体，单位表面积在波长 λ 附近单位波长间隔内向整个半球空间发射的辐射功率 $M_b(T)$ 与波长 λ 、温度 T 满足下列关系：

$$M_b(T) = C_1 \lambda^{-5} \left[\frac{1}{\exp\left(\frac{1}{\frac{C_2}{\lambda T}}\right)} \right] \quad (1-3)$$

式中： C_1 为第一辐射常数， $C_1 = 3.7415 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-4}$ ； C_2 为第二辐射常数， $C_2 = 1.43879 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ； C 为光速。

3. 斯蒂芬—玻尔兹曼定律

$$M_b(T) = \int_0^{\infty} M_{\lambda b}(T) d\lambda = \varepsilon T^4 \quad (1-4)$$

如果用 $M_b(T)$ 表示黑体单位表面积向整个半球空间发射的所有波长的总辐射功率，斯蒂芬—玻尔兹曼定律指出，物体红外辐射的能量密度与其自身的热力学温度 (T) 的四次方成正比，并与它的表面辐射率 (ε) 成正比。

物体温度越高，红外辐射越多，反之，物体温度越低，辐射越低。辐射率也一样，即使物体温度相同，高辐射率物体的辐射要比低辐射率物体的辐射多。所以物体的温度及表面辐射率决定着物体的辐射能力。

4. 维恩位移定律

黑体的红外辐射具有各种不同的波长，每种波长的红外辐射能量大小也不相同。人们通常把对应于辐射能量最大的波长，称为辐射的峰值波长 ($\lambda_{\max}$)。维恩由实验得出了峰值波长与黑体温度间关系的公式：

$$\lambda_{\max} = \frac{2897}{T} \quad (1-5)$$

式中： T ——黑体温度（K）；
 $\lambda_{\max}$ ——峰值波长（ μm ）。

5. 朗伯余弦定律

所谓朗伯余弦定律，就是指黑体（或任何其他辐射体）在任意方向上的辐射强度与观测方向相对于辐射表面法线夹角的余弦成正比。

$$I_{\theta} = I_0 \cos \theta \quad (1-6)$$

式中： I_{θ} 为在与辐射表面法线夹角为 θ 方向上的辐射强度； I_0 为 $\theta = 0$ 时的辐射强度。

对于辐射面积很小的黑体而言，在法线方向的辐射强度可表示为：

$$I_0 = \frac{1}{\pi} M_b(T) \Delta A \quad (1-7)$$

式中： ΔA 为黑体辐射源的辐射面积。

该式表明，黑体在辐射表面法线方向的辐射最强，因此，在实际做红外检测时应尽可能选择在被测表面法线方向进行。

（五）实际物体的红外辐射

实际上黑体并不存在，实际的物体并不是黑体，但它具有我们上面所说物体的所有特性，即具有吸收、辐射、反射、穿透红外辐射的能力。但对大多数物体来说，红外辐射不透明，即 $\tau = 0$ 。所以对于实际测量来说，辐射率 ε 和反射率 ρ 满足：

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (1-8)$$

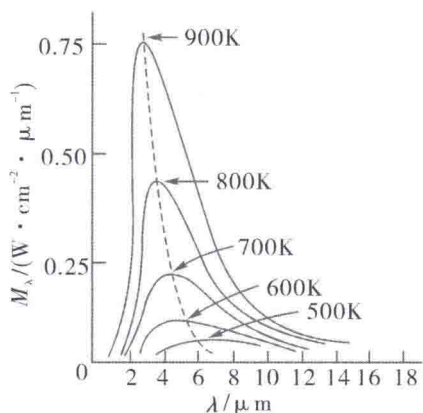


图 1-3 不同温度下的黑体光谱辐射度

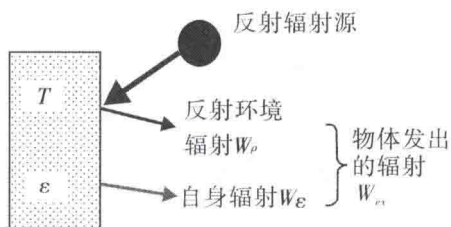


图 1-4 实际物体的红外辐射

实际物体的辐射由两部分组成：自身辐射和反射环境辐射，如图 1-4 所示。光滑表面的辐射率较高，容易受环境影响（反光）；粗糙表面的辐射率较高。不同的材料、温度、表面光度、颜色等，所发出的红外辐射强度都不同（辐射率不同）。

在检测过程中，由于辐射率对测温影响很大，因此必须选择正确的辐射系数。电力设备辐射率一般在 0.85~0.95 之间。

对运行的电力设备进行红外测温探测，多数情况下是通过比较来判断的，因此一般只需求出相对温度值的变化或相对温差的比值，而无须过分强调被测物体的红外辐射率。但若精确测量目标物体的真实温度，必须事先知道和了解物体的红外辐射率 ε 的范围。否则，测出的温度与物体的实际温度将有较大的误差。

二、红外检测原理

对设备热状态进行红外检测，首先必须将红外辐射转变为易于分析和处理的电信号。这种能够将红外辐射转变为电信号的器件，通常叫作红外探测器。一般来说，当红外辐射照射到物体上时，除了一部分被物体表面反射外，还有一部分被物体吸收。红外辐射进入物体后，它的能量将传递给物体内的原子、分子等粒子。这些粒子得到这部分能量后，其总动能将增加，无规则的运动将变得更激烈，在宏观上表现为物体温度升高。通常把物体吸收红外辐射后温度升高的效应叫作红外辐射对物体产生的一次效应。物体吸收红外辐射除了产生温度升高的一次效应外，同时还伴随着其他物理、化学性质的变化，如体积、折射率、电导率、二次发射等。这些性能的改变，称为物体吸收红外辐射后产生的二次效应。

其次是对电力设备运行情况的确证和分析。必须从观察者的角度准确地确定设备红外辐射的分布，即再现设备红外辐射的分布情况。通常，把从观察者角度重现设备红外辐射的物理过程称为红外成像。

红外热像仪可将不可见的红外辐射转换成可见的图像。物体的红外辐射经过镜头聚焦到探测器上，探测器产生电信号，电信号经过放大并数字化到热像仪的电子处理区域，再转换成我们能在显示器上看到的红外图像。其基本原理如下图所示：

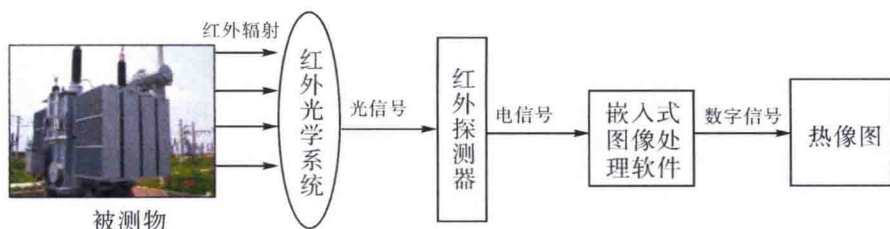


图 1-5 红外检测原理

三、电力设备发热机理

对于高压电气设备的诸多故障，如果从红外检测与诊断的角度来讲，大体可以分为两大类，即外部故障和内部故障。外部故障是指裸露在设备外部各部位发生的故障（如长期暴露在大气环境中工作的裸露电气接头故障、设备表面污秽以及金属封装的设备箱体涡流过热等）。因这类故障直接暴露在红外监测仪器的视场范围内，故红外检测时很容易就可以获取直观的故障信息。内部故障则是指封闭在固体绝缘、油绝缘及设备内部的各种故障。由于这类故障部位受到绝缘介质或设备壳体的阻挡，所以通常难以像外部故障那样从设备外部直接获得直观的故障信息。但是，根据各种电气设备的内部结构和运行工况，依据传热学理论，分析传导、对流和辐射三种热交换形式沿不同传热路径的传热贡献（多数情况下只考虑金属导电回路、绝缘油和气体介质等引起的传导和对流），并结合模拟试验、大量现场检测实例的统计分析和解体验证，也能够获得电气设备内部故障在设备外部的温度分布规律或热（像）特征，从而对设备内部故障的性质、部位及严重程度作出判断。因此，必须研究电气设备故障的主要模式、产生原因。

（一）电阻损耗增大

根据焦耳定律，电流通过导体存在的电阻将产生热能，其发热功率为：

$$P = K_f I^2 R \quad (1-9)$$

式中： P ——发热功率（W）；

I ——通过的负荷电流（A）；

R ——载流导体的直流电阻（ Ω ）；

K_f ——附加损耗数。

理想情况下，假如导电回路中的各种连接件、接头或触头接触电阻低于相连接导体部分的电阻，那么连接部位的电阻损耗发热不会高于（甚至低于）相邻载流导体的发热。然而，一旦某些连接件、接头或触头因接触不良造成接触电阻增大，则从式（1-9）可以看出，该连接部位与周围导体部位相比，会产生更多的电阻损耗发热功率和更高的温升，从而造成局部过热。

（二）介质损耗增大

电气绝缘介质，由于交变电场的作用，使介质极化方向不断改变而消耗电能并引起发热，由此产生的发热功率为：

$$P = U^2 \omega C \tan \delta \quad (1-10)$$

式中： U ——施加的电压（V）；

ω ——交变电压的角频率；

C ——介质的等值电容 (F)；

$\tan\delta$ ——绝缘介质损耗因数或介质损耗角正切值。

由于绝缘电介质因介质损耗产生的发热功率与所施加的工作电压的平方成正比，而与负荷电流大小无关，因此称这种损耗发热为电压效应引起的发热。介质损耗的微观本质是电介质在交变电压作用下产生的两种损耗：一种是电导引起的损耗；另一种是由极性电介质中偶极子的周期性转向极化和夹层介质界面极化引起的极化损耗。

引起绝缘电介质材料介质损耗增大的主要原因包括以下两点：

(1) 固体绝缘材料材质不佳或老化。许多高压电气设备中的导电体绝缘材料材质不佳，或在长期运行中由于高温与氧化作用而发生老化，甚至出现开裂或脱落，导致绝缘性能劣化，材质发软或变脆，分解或进水受潮等。

(2) 液体绝缘介质性能劣化、受潮以及绝缘介质本身的化学变化（如绝缘油受热与氧化，产生有机酸和蜡状物等）。

(三) 铁磁损耗增大

对于由绕组或磁回路组成的高压电气设备，由于铁芯的磁滞、涡流而产生的电能损耗称为铁磁损耗或铁损。如果由于设备结构设计不合理、运行不正常，或者由于铁芯材质不良、铁芯片间绝缘受损，出现局部或多点短路，可分别引起回路磁滞或磁饱和，或在铁芯片间短路处产生短路环流，增大铁损并导致局部过热。另外，对于内部带铁芯绕组的高压电气设备（如变压器和电抗器等），如果出现磁回路漏磁，还会在铁制箱体产生涡流发热。由于交变磁场的作用，电器内部或载流导体附近的非磁性导电材料制成的零部件有时也会产生涡流损耗，因而导致电能损耗增加和运行温度升高。此类发热后于电磁效应引起的发热。

(四) 电压分布异常和泄漏电流增大

有些高压电气设备（如避雷器和输电线路绝缘子等）在正常运行状态下都有一定的电压分布和泄漏电流，但是当出现某些故障时，将改变其分布电压 U_d 和泄漏电流 I_g 的大小，并导致其表面温度分布异常。此时的发热虽然仍属于电压效应发热，但发热功率由分布电压与泄漏电流的乘积决定：

$$P = U_d I_g \quad (1-11)$$

(五) 缺油及其他

油浸高压电气设备由于渗漏或其他原因（如变压器套管未排气）而造成缺油或假油位，严重时会引起油面放电，并导致表面温度分布异常。这种热特征除放电时引起发热外，通常主要是由于设备内部油位面上下介质（如