

电气工程
新技术丛书

输变电设备状态检修 非电量测试技术

主编 胡灿 刘平



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

电气工程新技术丛书

输变电设备状态检修 非电量测试技术

主编 胡灿 刘平

西南交通大学出版社

· 成都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

输变电设备状态检修非电量测试技术 / 胡灿, 刘平主编.
—成都: 西南交通大学出版社, 2011.3
(电气工程新技术丛书)
ISBN 978-7-5643-0971-8

I. ①输… II. ①胡… ②刘… III. ①输电—电气设备—检修—非电量测量②变电所—电气设备—检修—非电量测量
IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 238089 号

电气工程新技术丛书

Shubiandian Shebei Zhuangtai Jianxiu Feidianliang Ceshi Jishu

输变电设备状态检修非电量测试技术

主编 胡 灿 刘 平

责任编辑	李芳芳
特邀编辑	宋彦博
封面设计	本格设计
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川省印刷制版中心有限公司
成品尺寸	170 mm×230 mm
印 张	10.125
字 数	183 千字
版 次	2011 年 3 月第 1 版
印 次	2011 年 3 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-0971-8
定 价	48.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

内容简介

准确获取反映输变电设备状态的特征信息是实施输变电设备状态检修的前提,非电量测试技术则是获取这些特征信息的重要手段。本书主要针对电网系统中的输变电设备,对常用的非电量测试方法进行了介绍,包括红外测温诊断技术、紫外检测技术、局部放电超声波检测技术、支柱瓷绝缘子超声波检测技术、SF₆气体分析、SF₆气体红外成像检漏技术、变压器油中故障特征气体分析与诊断等共七个部分。本书从上述七种常用技术的基本原理出发,对现场常用设备进行了介绍,对影响测试的因素以及注意事项进行了归纳,并附上现场典型检测实例,循序渐进,对非电量测试技术进行了系统的阐述。本书适合广大工程技术人员学习和参考。

前 言

随着国民经济的持续、健康、高速增长,全社会用电量屡创新高。为满足人民群众日益增长的用电需求,电力工业迅猛发展,电网规模迅速扩大,特高压交、直流工程的建成投运更是为电力工业的发展掀开了新的一页。

电力工业是国民经济的重要支柱产业,电力系统的安全关系整个国民经济,关乎国计民生。尤其是特高压交、直流输电系统,由于其输送容量巨大,一旦发生故障,不但可能引发切机、甩负荷等,造成电能输送的损失,而且大量负荷的突变还将给送、受端电网造成巨大冲击,危及区域电网甚至全国电网的安全。输变电设备是电力系统的基本组成元素,其可靠性直接影响到整个系统的安全稳定运行。通过监测输变电设备运行中各特征参量的变化,对其健康状态进行科学评估,根据评估结果制定检修策略,进而实施输变电设备状态检修,能够有效避免计划检修造成的“当修不修”以及设备状态良好而到达计划周期时的停电检修,从而节约检修成本,提高设备可用率,提升系统可靠性,保证供电服务质量。

准确获取反映输变电设备状态的特征信息是实施输变电设备状态检修的前提,非电量测试技术则是获取这些特征信息的重要手段。在电力系统众多科研院所、高校及设备制造厂家的共同努力下,非电量测试作为一种先进的电气设备运行状态检测手段,如今已经被广泛地应用到电力生产的诸多环节,取得了丰硕的研究成果,积累了大量的宝贵经验。编者在认真查阅各类文献资料、技术报告、设备说明书,调研和交流实际应用经验和心得,并进行大量试验研究和应用实践的基础上,对这些成果和经验进行归纳和整理,力求抛砖引玉,进一步提高非电量测试的技术水平,促进输变电设备状态检修的顺利开展。

本书由胡灿、刘平主编。全书共分为七章:第1章,红外测温诊断技术,由濮峻嵩编写;第2章,紫外检测技术,由甘德刚、刘曦编写;第3章,局部放电超声波检测技术,由刘睿、甘德刚、刘曦编写;第4章,支柱瓷绝缘子超声波检测技术,由冯运编写;第5章,SF₆气体分析,由张力编写;第6章,SF₆气体红外成像检漏技术,由刘曦、甘德刚编写;第7章,变压器油中故障特征气体分析与诊断,由张微

编写。张宗喜、蒋伟、吴驰、杨琳、贾志杰等参加了部分内容的校验工作。每章都介绍了对应的非电量测试技术的基本原理、常用设备、影响因素、测试实例等。

在本书的编写过程中,得到了四川省电力公司科技信息部和四川电力科学研究院有关领导的大力支持,写作过程中还参阅了国内诸多单位和专家的资料和文献,在此一并致谢。

限于时间和编者水平,书中难免存在不妥或疏漏之处,敬请读者批评指正。

编 者

2010年5月

目 录

第 1 章 红外测温诊断技术	1
1.1 红外线基本知识	1
1.2 物体的红外辐射	2
1.2.1 黑体的红外辐射规律	3
1.2.2 实际物体的红外辐射规律	4
1.2.3 影响物体表面辐射率的因素	5
1.2.4 实际物体的红外辐射、反射、透射	5
1.3 电气设备红外测温诊断原理	7
1.3.1 回路电阻损耗增大引起发热	7
1.3.2 介质损耗增大引起发热	8
1.3.3 铁损增大引起发热	8
1.3.4 电压分布异常和泄漏电流增大引起发热	9
1.3.5 缺油及其他故障引起发热	9
1.4 红外测温仪器	9
1.4.1 红外辐射测温仪	10
1.4.2 红外热像仪	10
1.5 高压电气设备红外诊断方法	12
1.5.1 表面温度判断法	12
1.5.2 相对温差判断法	12
1.5.3 同类比较法	12
1.5.4 图像特征判断法	12
1.5.5 档案分析法	13
1.5.6 实时分析判断法	13
1.6 电气设备红外诊断实例及典型图谱	13
1.6.1 开关类设备的红外诊断	13

1.6.2	高压套管的红外诊断	15
1.6.3	电力变压器的红外诊断	17
1.6.4	互感器的红外诊断	18
1.6.5	电力电容器的红外诊断	21
1.6.6	高压架空输电线路的红外诊断	23
1.6.7	避雷器的红外诊断	24
1.6.8	高压电力电缆的红外诊断	25
1.6.9	绝缘子的红外诊断	27
1.6.10	其他发热缺陷的红外诊断	30
1.7	影响红外诊断准确性的因素	31
1.7.1	目标表面的辐射率	31
1.7.2	背景辐射	32
1.7.3	环境温度	32
1.7.4	气象条件	32
1.7.5	大气衰减影响	33
1.7.6	测试距离	34
1.7.7	设备运行状态	34
1.8	电力设备红外诊断的发展方向	35
第 2 章	紫外检测技术	36
2.1	紫外检测原理	36
2.1.1	日盲型紫外检测设备	38
2.1.2	夜视型紫外检测设备	42
2.2	影响紫外检测的主要因素	45
2.2.1	外部因素	45
2.2.2	内部因素	46
2.3	紫外检测技术的应用	47
2.4	紫外检测技术的展望	52
第 3 章	局部放电超声波检测技术	53
3.1	变压器局部放电超声波检测技术	53
3.1.1	变压器局部放电产生的原因及危害	53
3.1.2	变压器局部放电超声波检测原理	54

3.1.3	变压器局部放电超声波检测诊断方法	55
3.1.4	影响变压器局部放电超声波检测的因素	58
3.2	GIS局部放电超声波检测技术	59
3.2.1	GIS局部放电超声波检测原理	59
3.2.2	GIS局部放电超声波检测诊断方法	61
3.2.3	影响GIS局部放电超声波检测的因素	66
3.3	高压设备局部放电超声波检测技术典型实例分析	66
3.3.1	变压器局部放电超声波检测技术典型实例分析	66
3.3.2	GIS局部放电超声波检测技术典型实例分析	75
3.4	局部放电超声波检测技术展望	76
第4章	支柱瓷绝缘子超声波检测技术	78
4.1	支柱瓷绝缘子超声波检测的基本原理	79
4.1.1	支柱瓷绝缘子的构成	79
4.1.2	支柱瓷绝缘子断裂的特点	79
4.1.3	支柱瓷绝缘子缺陷的形成原因	80
4.1.4	超声波检测的基本原理	81
4.2	支柱瓷绝缘子超声波检测的常用设备	84
4.2.1	超声波检测仪	84
4.2.2	探头	85
4.2.3	耦合剂	86
4.3	支柱瓷绝缘子超声波现场检测及典型图谱分析	87
4.3.1	现场检测注意事项	87
4.3.2	爬波检测典型图谱	88
4.3.3	小角度纵波检测典型图谱	88
4.4	影响支柱瓷绝缘子超声波检测的因素	89
4.5	支柱瓷绝缘子超声波检测的发展方向	90
第5章	SF ₆ 气体分析	92
5.1	SF ₆ 气体湿度测试	92
5.1.1	测试原理及典型仪器设备	93
5.1.2	测试注意事项	96
5.1.3	湿度异常增高现象	97

5.2 SF ₆ 气体分解产物分析	98
5.2.1 SF ₆ 气体分解产物的产生原理和主要成分	99
5.2.2 测试原理及典型仪器设备	100
5.2.3 故障诊断方法	107
5.2.4 典型实例分析	109
第6章 SF₆气体红外成像检漏技术	115
6.1 SF ₆ 气体的特点	115
6.1.1 SF ₆ 气体的化学特性	115
6.1.2 SF ₆ 气体的危害	115
6.2 SF ₆ 气体检漏技术	117
6.2.1 技术现状	117
6.2.2 红外成像检漏技术原理	118
6.3 影响红外检漏准确性的因素	124
6.4 应用实例	125
6.5 SF ₆ 气体红外成像检漏技术的发展方向	129
第7章 变压器油中故障特征气体分析与诊断	130
7.1 产气原理	130
7.1.1 绝缘油的分解	130
7.1.2 固体绝缘材料的分解	131
7.2 运行中电气设备油中气体的来源	131
7.2.1 空气的溶解	131
7.2.2 气体的其他来源	132
7.2.3 正常运行下的产气	132
7.2.4 故障下的产气	133
7.3 变压器油中溶解气体含量检测和诊断	135
7.3.1 变压器油中溶解气体含量的检测	135
7.3.2 对充油电气设备状况的诊断	142
7.4 典型实例分析	145
参考文献	151

第1章 红外测温诊断技术

红外诊断技术基于红外辐射原理,能够实现被测物表面温度场的探测,可以及时、有效地发现各类设备的过热缺陷,具有非接触、实时、形象、直观和效益投资比高等一系列优点,在很多领域得到了广泛应用。电力系统中利用红外诊断技术可以检测和诊断电力设备大量内部、外部缺陷,尤其还可以诊断许多常规试验方法不便于或无法检测的故障。

相对于其他检测手段,红外诊断技术具有以下突出优点:

- (1)测试时不接触设备,无需取样、解体设备,不要求设备停运;
- (2)操作简便、检测速度快、工作效率高,这对于开展状态诊断工作尤为重要;
- (3)可以明确、直观地显示故障部位和故障的严重程度;
- (4)可诊断的设备类型、故障类型较其他试验方法广,并涉及一些其他试验方法无法涉及的领域;
- (5)在设备实际运行状态下测试,相对停电试验方法更真实、准确;
- (6)经济效益好、安全性高。

1.1 红外线基本知识

红外线是由威廉姆·赫胥尔(William Herschel)在1800年发现的,它实际上是电磁波谱的一部分。理论上,通常把波长大于红色光线波长、小于 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 的这一段电磁波称作“红外线”,也常称作“红外辐射”。它在电磁波谱中占据了波长为 $0.75\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$ 这一波谱区段,如图1.1所示。

工程实际中根据红外线的波长通常将红外线分为近红外线($0.75\sim 3\ \mu\text{m}$)、中红外线($3\sim 6\ \mu\text{m}$)、远红外线($6\sim 15\ \mu\text{m}$)以及极远红外线($15\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$)。由于大气中存在 O_2 、 N_2 、水蒸气等各种气体分子及尘埃微粒,对在其中传播的电磁波具有一定的吸收、散射等效应,因此,当红外线在大气中辐射的时候就存在

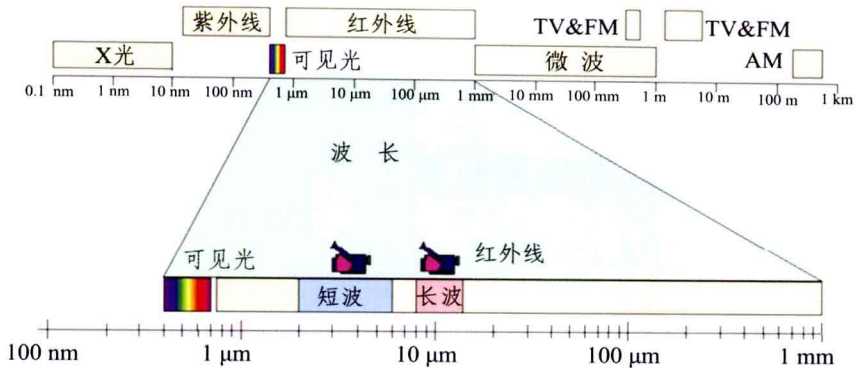


图 1.1 红外线在电磁波谱中的位置

大气透射率的问题。如图 1.2 所示为红外线波长与大气透射率之间的关系。从图中可以看出,不同波长的红外线经过大气的衰减是不同的,特别是波长介于 $5.5 \sim 7.5 \mu\text{m}$ 的红外线在大气中传播时将完全被大气吸收,因此大气对这一波长区段的红外线不透明,采用红外检测仪器也将无法探测此区段红外辐射,所以红外检测设备的有效工作波长均避开此区段。目前世界上绝大部分红外热像仪所使用的波段为:短波 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,长波 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 。

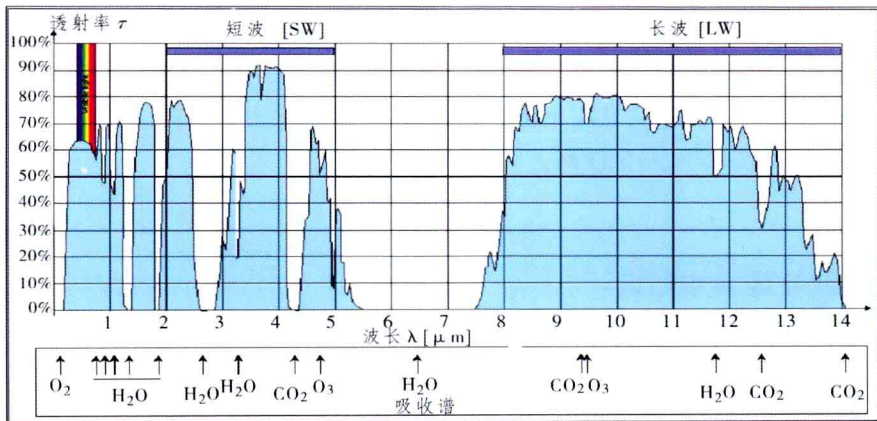


图 1.2 红外线波长与大气透射率的关系

1.2 物体的红外辐射

物体的红外辐射是指所有经物体表面发出的辐射。实际物体的红外辐射,

包含物体自身温度造成的对外红外辐射以及该物体反射、透射的其他热源的红外辐射。其中物体自身发出的辐射是我们最为关心的一般也是最主要的部分。

1.2.1 黑体的红外辐射规律

由于实际物体的红外热辐射受诸多因素影响,情况较为复杂,所以在研究和应用中,假定了具有理想中最大辐射功率的物体,并称之为“黑体”。黑体所吸收的红外线能量与发射出的红外线的能量相等,并且其对红外辐射的吸收率与辐射的波长无关,恒等于1。黑体只是人们抽象出来的一种理想化的物体模型,但是黑体热辐射的基本规律却是红外科学领域中许多理论研究和技术应用的基础。黑体的辐射可以概括为以下四个基本规律:

1. 辐射的光谱分布规律——普朗克黑体辐射定律

一个绝对温度为 $T(\text{K})$ 的黑体,其单位表面积在波长 λ 附近单位波长间隔内向整个半球空间发射的辐射功率(简称光谱辐射度) M_b 与波长 λ 、温度 T 满足下列关系:

$$M_b = c_1 \lambda^{-5} [\exp(c_2/\lambda T) - 1]^{-1} \quad (1.1)$$

式中 c_1 ——第一辐射常数, $c_1 = 3.741\ 77 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$;

c_2 ——第二辐射常数, $c_2 = 1.438\ 77 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

式(1.1)给出了黑体在温度为 $T(\text{K})$ 时的辐射光谱分布特征,如果将不同的温度值代入式(1.1),则可得黑体在不同温度下的辐射光谱分布曲线,如图1.3所示。可以看出黑体辐射的特征是:在任何温度下,黑体的光谱辐射度都随着波长连续变化且只有一个极大值;随着温度的升高,黑体辐射中的短波长辐射所占比例增加;随着温度的升高,在任一波长处,光谱辐射度也增大,反之亦然。

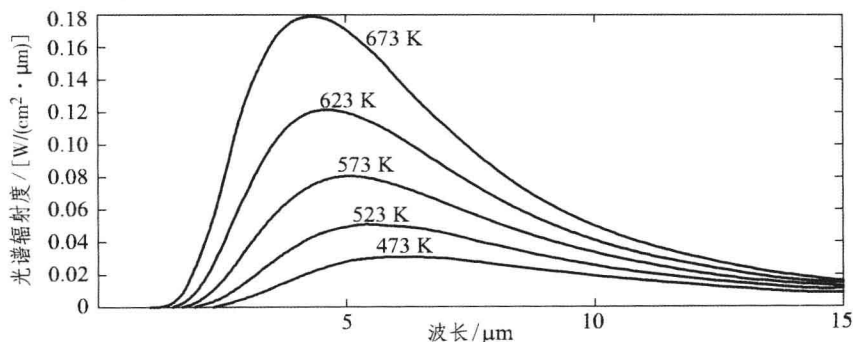


图 1.3 黑体在不同温度下的辐射光谱分布曲线

2. 辐射光谱的移动规律——维思位移定律

黑体光谱辐射度极大值相对应的波长 λ_m (峰值辐射波长) 随温度的变化关系为:

$$\lambda_m T = 2\,897.8 (\mu\text{m} \cdot \text{K}) \quad (1.2)$$

该关系式表明,黑体辐射光谱分布的峰值波长 λ_m 随其绝对温度 T 成反比变化。

3. 辐射功率随温度的变化规律——斯忒藩-玻耳兹曼定律

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 $M_b(T)$ (简称全辐射度) 随其温度的变化遵守如下规律:

$$M_b T = \sigma T^4 \quad (1.3)$$

式中, $\sigma = 5.669\,6$, 称为斯忒藩-玻耳兹曼常数。可见,黑体单位表面积发射的总辐射功率与其绝对温度的四次方成正比。

4. 辐射的空间分布规律——朗伯余弦定律

所谓朗伯余弦定律就是黑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,数学表述为:

$$I_\theta = I_0 \cos\theta \quad (1.4)$$

式中 I_θ ——在与辐射表面法线夹角为 θ 方向上的辐射强度;

I_0 ——在辐射表面法线方向 ($\theta = 0$) 上的辐射强度。

式(1.4)表明,黑体在辐射表面法线方向上的辐射最强,所以,为有效地检测物体的红外辐射,应尽可能选择在被测物表面法线方向进行。

1.2.2 实际物体的红外辐射规律

黑体的辐射光谱和辐射强度只与温度及波长有关,与构成黑体的材料无关。现实中的物体发射和吸收辐射的能力都低于相同条件下的黑体。而且实际物体的辐射强度除了与温度和波长相关外,还与该物体的材料性质和表面状态有关。对于实际的物体来说,其单位面积的辐射能量与温度的关系可表示为:

$$M(T) = \varepsilon_r \sigma T^4 \quad (1.5)$$

其中 ε_r 为辐射率,定义为同一温度及波长条件下,实际物体的辐射能量与黑体辐射能量的比值,即:

$$\varepsilon_r = M(T) / M_b(T) \quad (1.6)$$

由式(1.5)可知物体温度越高,红外辐射越强;物体温度一样,高辐射率物

体的辐射要比低辐射率物体的辐射强。所以,物体的温度及表面辐射率决定着物体的辐射能力。

1.2.3 影响物体表面辐射率的因素

1. 材料

不同性质的材料对红外辐射的吸收、透射性能各异。一般来说,绝大多数纯金属表面的辐射率都很低,而非金属材料,尤其是金属氧化物在红外光谱区则一般具有较高的辐射率,同种非金属材料的辐射率变化也不大。

2. 表面状态

一般来说,材料表面越粗糙,辐射率就越高。抛光、光亮、平滑的表面辐射率较低,而喷砂、不光滑的表面辐射率较高。

3. 几何形状

几何形状是指物体的物理外形。一个物体即使有低辐射率的光滑表面,但如果其表面上有孔,那么越深的孔其辐射率就越高。

4. 辐射波长

大部分物体的辐射率不会随波长的变化而有太大的变化,我们常取整个波段辐射率的平均值作为其辐射率值,但有的物体的辐射率会随着波长的变化而有显著变化。

5. 温度

物体的温度对辐射率也有影响,但大多数情况下影响较小。一般来说,非金属材料的辐射率随温度升高而减小,金属材料的辐射率近似地随温度成比例增大,比例系数与金属电阻率有关。

工程上通常将常见的各种材料的辐射率制作成辐射率表(见表 1.1),以便使用时查询。

1.2.4 实际物体的红外辐射、反射、透射

实际的物体并不是黑体,它具有吸收、辐射、反射、透射红外辐射的能力。如图 1.4 所示,来自外界的红外辐射到达物体的表面后,一部分能量被物体吸收,这一分量为 W_a ;另一部分能量被反射,这一分量为 W_p ;最后一部分能量会穿过

表 1.1 常见材料辐射率表

材料			辐射率	材料		辐射率
金 属	铝	抛光	0.04 ~ 0.06	非 金 属	石棉	0.95
		阳极氧化	0.55		沥青	0.95
		氧化	0.11 ~ 0.25		纸	0.70 ~ 0.90
	铜	抛光	0.02 ~ 0.05		混凝土	0.92
		非氧化	0.20		水、冰水	0.95
		氧化	0.6 ~ 0.88		石膏	0.80 ~ 0.90
	钢	抛光	0.10		皮肤	0.98
		平板	0.40 ~ 0.60		碳	0.95
	钨		0.05		油漆	0.80 ~ 0.98
	镍	电镀抛光	0.05		土壤	0.90 ~ 0.98
		电镀非抛光	0.11		橡胶	0.95
		氧化	0.30 ~ 0.50		瓷器	0.93
	铅	抛光	0.05 ~ 0.07		木头	0.93
		粗糙	0.40		冰	0.98
氧化		0.30 ~ 0.60	纤维板	0.95		
锌	非氧化	0.05	灯黑	0.96		
	镀锌铁板	0.25	砂子	0.90		

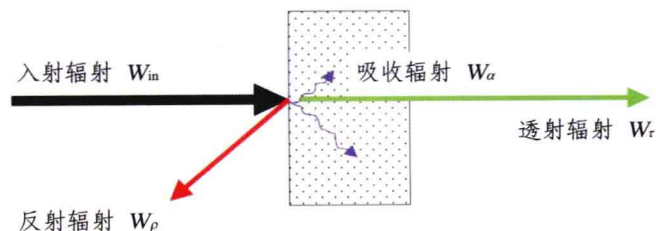


图 1.4 实际物体的红外反射、吸收与透射

物体透射出去,这一分量为 W_{τ} ,用公式表示为:

$$W_{in} = W_{\alpha} + W_{\rho} + W_{\tau} \quad (1.7)$$

式(1.7)体现了能量守恒定律,吸收、反射和透射的能量在总辐射能量中所占的比例,要取决于物体本身的材料特性,体现为吸收率(α)、反射率(ρ)、透射率(τ),因此,式(1.7)也可表示为:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1.8)$$

对于给定的物体和入射辐射,吸收、反射、透射的能量不变。若物体处于热平衡状态,则物体吸收的辐射能量必然全部转化为该物体对外的辐射能量。由此可以断言,在热平衡条件下,物体的吸收率必然等于该物体在同温度下的辐射率,即:

$$\varepsilon(T) = \alpha(T) \quad (1.9)$$

对大多数物体来说,对红外辐射不透明,即 $\tau=0$ 。所以对于实际测量来说,有:

$$\varepsilon(T) + \rho(T) = 1 \quad (1.10)$$

即实际测量时物体的辐射由两部分组成:自身辐射和环境反射。这个概念不仅对温度测量来说非常重要,而且对正确地解读红外热图也非常重要。

1.3 电气设备红外测温诊断原理

对于高压电气设备的红外测温诊断,主要是从设备表面温度场的分布以及变化的角度来分析判断设备运行状态、健康状况,从而实现缺陷查找,为检修提供依据。导致高压电气设备发热缺陷的原因有:回路电阻损耗增大、介质损耗增大、铁损增大、电压分布异常和泄漏电流增大、缺油及其他故障。

1.3.1 回路电阻损耗增大引起发热

电力系统导电回路中不可避免地存在着一定的电阻,因此,当通过负荷电流时,必然有一部分电能电阻上以热损耗的形式消耗掉,由此产生的发热功率为:

$$P = K_f I^2 R \quad (1.11)$$

式中 P ——发热功率, W;

K_f ——附加损耗系数;

I ——通过的负荷电流, A;

R ——载流导体的直流电阻值, Ω 。

K_f 为在交流电路中考虑集肤效应时使电阻增大的系数。如果在一定应力作用下使导体局部拉长、变细,或多股绞线断股,或因松股而增加表面层氧化,都会减小金属导体的导流截面积,从而造成导体自身局部电阻增大,导致电阻损耗的发热功率增加,出现局部温度升高。

对于导电回路中的导体连接部位如触头等而言,式(1.11)中的电阻值 R 即