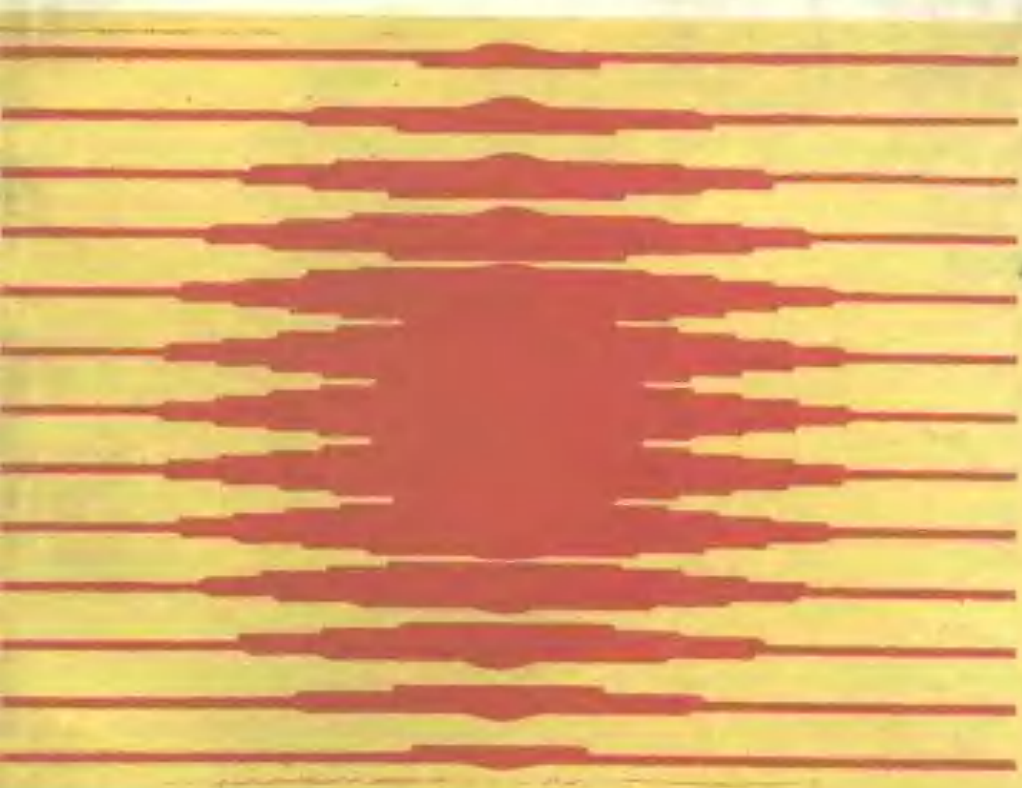


设备诊断技术丛书



张维力 和丕训 李春荣

红外诊断技术

水利电力出版社

设备诊断技术丛书

红外诊断技术

张维力 和丕训 李春荣



水利电力出版社

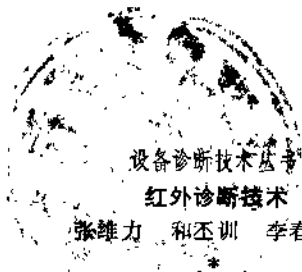
(京)新登字115号

内 容 提 要

本书简要地介绍了红外技术在工业企业设备诊断工作中的应用原理和方法；重点介绍了红外测温仪、红外成像仪和红外热电视这三种主要红外诊断仪器的工作原理和技术参数。此外，本书还介绍了几种典型的红外诊断工作情况。

本书可供从事工业企业设备管理的工程技术人员阅读，也可供工科大专院校师生参考。

2542/14



水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路8号)

各地新华书店经销

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 4.25印张 93千字

1991年10月第一版 1991年10月北京第一次印刷

印数0001—1290册

ISBN 7-120-01459-5/FK·234

定价3.60元

前 言

红外诊断技术主要是指应用红外物理理论和近代红外技术成果,来解决现代设备管理系统工程中设备诊断问题的一个新兴技术领域。这一技术目前还处在发展的初级阶段,许多理论性的问题和许多实践中的问题都正在讨论中。但是,由于这一技术已经成功地解决了许多无接触测温 and 热故障诊断问题,所以受到愈来愈广泛的重视。

我国在60年代开展了应用红外测温仪测量高压输电线接头温度的试验研究工作,从而开创了我国的红外诊断技术应用工作。70年代和80年代初期,我国又引进了瑞典生产的红外热像仪,并且自己研制了红外热电视,把我国的红外诊断技术的研究与应用工作提高到一个新的水平上。目前,我国已可以批量生产用于红外诊断的红外测温仪,并研制成功和少量试生产各种红外热像仪与红外热电视,同时还引进了近百套先进的红外热像系统,为推动我国的红外诊断技术的发展打下了良好基础。

为了进一步开展我国的红外诊断技术应用工作,我们在中国电力企业联合会电力设备管理协会设备诊断委员会的支持下,编写了这本入门图书,希望为广大从事设备管理的工程技术人员和有志于从事这一工作的读者,提供有关这一新兴技术的概貌。

红外诊断技术还正在发展,它的应用范围正在扩大,所以本书编写和出版的另一个目的是希望广大读者向我们提出批评和建议,以共同完善这本著作。

本书由张维力（第二章）、和丕训（第一章）和李春荣（第三章）编写。全书由张维力统稿。

本书由我国著名红外技术专家林钧挺教授级高级工程师审校。特此表示感谢！

作 者

1989年12月26日

目 录

前言

第一章 红外诊断基本原理	1
第一节 红外诊断技术和设备诊断	1
第二节 红外辐射及其传输	5
第三节 红外探测器	13
第四节 红外成像原理	24
第二章 红外诊断仪器	35
第一节 红外诊断仪器的一般概念	35
第二节 红外测温仪	37
第三节 红外热像仪	58
第四节 红外热电视	81
第三章 红外诊断技术的应用	108
第一节 电气设备的热状态与红外辐射	108
第二节 红外测温诊断	114
第三节 热状态异常普查诊断	120
第四节 红外精密诊断	124
第五节 红外诊断仪器在飞机巡线中应用	128

第一章

红外诊断基本原理

第一节 红外诊断技术和设备诊断

一、红外诊断技术概述

红外诊断技术是利用红外物理的理论和研究成果,根据设备诊断工作的具体需要,把红外辐射特性的分析应用于设备状态诊断的一个综合应用工程技术。因此,红外诊断技术是红外技术的一个组成部分,同时又是设备状态诊断的一个重要手段。

设备诊断 (Machine Candition Diagnosis), 一般是指对运行设备实际工作状态的确定和设备运行可靠性的判断,并且对设备的维修、使用、管理等工作提出决策性建议。设备的工作状态是从多方面反映出来的,其中设备的热状态是反映设备运行状态的一个很重要方面。热状态的变化和异常过热,往往对确定设备的实际工作状态和判断设备运行的可靠性具有重要的影响。通过对设备红外辐射特性的确定和分析,是确定和判断设备热状态的良好途径,因此红外诊断技术,在设备诊断工作中占有重要的地位。

二、红外诊断技术的主要内容

红外诊断技术是通过通过对设备红外辐射特性的确定和分析,来实现对设备热状态的诊断。如果说红外物理 (Infra-red Physics) 是应用物理学的一个领域,它系统地研究红外辐射各种问题是在1960年前后才正式形成,那么建立在红

外物理上的红外诊断技术的形成和发展只是近十几年才开始。所以，红外诊断技术还处于发展的初期阶段，在这一阶段中其主要内容如下：

(1) 红外测温仪研制与应用 研究和制造红外测温仪，并使用它对运行设备特定表面范围的温度或温度变化进行确定和分析，是红外诊断技术发展最成熟的一个领域。这一内容有时也称为无接触测温。

(2) 热像显示装置的研制与应用 设备的热像(热图像)是指设备表面红外辐射强度分布的可见图像，它可以形象而直观地描绘出设备表面的温度分布场，为快速、准确地普查运行设备，并诊断出热状态异常部位提供可能。正是在这个方面的应用，红外诊断技术显示了它的优越性。

(3) 设备热状态精密诊断 近年来红外诊断技术中又应用了电子计算机技术，开拓了设备热状态精密诊断内容，这就是通过对设备红外辐射数据的连续采集与分析，对设备的热状态进行精密的诊断。同时，还可以存贮设备运行工况的红外辐射数据，建立设备典型热状态的诊断资料数据库。

三、红外诊断技术的特点

红外诊断技术和其他诊断技术及常规测温相比，具有以下几个优点：

(1) 操作安全 由于进行红外诊断时不需要与设备直接接触，所以操作十分安全。这一优点在带电设备、转动设备、高空设备的诊断中表现尤为突出。

(2) 灵敏度高 现代红外探测器对红外辐射的探测灵敏度很高，因此以这类探测器为基础构成的红外诊断仪器也具有对温度分辨很高的灵敏度，如使用红外诊断仪器可以发

现设备有 0.1°C 的温度差别，可以诊断出设备热状态的细微变化。

(3) 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。

(4) 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，或者仪器本身包含有微型计算机。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。

红外诊断技术除具有以上的优点外，还有以下几点不足之处，这些不足之处一方面限制了其应用的范围，另一方面也是它进一步发展面临的问题。

(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，但是很难准确地确定出设备上某一点确切的温度值。其根本原因是设备的红外辐射除与设备温度有关外，还受其它许多因素的影响，特别是设备表面状况的影响。所以，在必须精确地确定设备温度值时，单纯使用红外诊断技术是不够的。

(2) 难于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，而不可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，则红外诊断技术通常只能直接诊断出设备暴露于大气中部分的过热故障或热状态异常。

(3) 价格昂贵 红外诊断仪器由于是高技术产品，更新换代迅速，生产批量不大，因此与其他诊断仪器或常规测

温仪表比较，其价格是比较昂贵的。

四、红外诊断技术的发展简况

1800年，赫胥尔从热效应观点研究各种颜色的可见光时，意外地发现了红外辐射。但是由于测量上的困难，对红外辐射的认识一直停留在初级阶段，直到本世纪中期，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。

红外理论的实际应用是从军事方面开始的。特别是红外前视系统 (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诊断，首先是从电力工业中开始的。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，开发出第一代工业用的红外热像仪 (Thermovision)。在此同时，各种各样的用于设备热状态诊断的红外测温装置也相继出现。这些红外测温仪产品不仅是可以进行温度测量，更重要的是应用于设备热状态诊断。70年代红外诊断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探测为基础的红外热电视。目前红外诊断技术正和电子计算机技术、图像处理技术相结合，在设备诊断中发挥更大的作用。

第二节 红外辐射及其传输

红外辐射 (Infrared Radiation) 实际就是波长为 $0.75 \sim 1000\mu\text{m}$ 的电磁波。由于 $0.75 \sim 1000\mu\text{m}$ 波长的波段位于可见光和微波之间, 并且比红光的波长更长, 所以红外辐射也称为红外线。此外, 由于任何温度高于绝对零度 (0K) 的物体, 都在不停地进行红外辐射, 所以红外辐射还称为热辐射 (Thermal Radiation)。从图 1-1 中可清楚地看出, 红外辐射在电磁辐射波长范围内所处的位置。

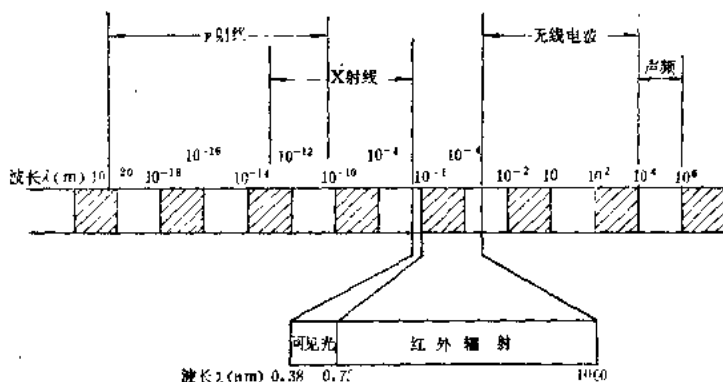


图 1-1 电磁辐射波长范围示意

为了研究和应用的方便, 在红外技术中通常还把红外辐射划分为三个波段:

(1) 近红外波段 波长为 $0.75 \sim 3.0\mu\text{m}$ 的红外辐射。

(2) 中红外波段 波长为 $3.0\sim 20\mu\text{m}$ 的红外辐射。

(3) 远红外波段 波长大于 $20\mu\text{m}$ 的红外辐射。

红外辐射和人们熟悉的可见光辐射(即光线)都是电磁辐射(电磁波),但由于波长的差异,造成了物理性能上的许多不同。下面指出其中的几点:

(1) 不可见性 红外辐射不可能对人类视觉产生作用,因此人类无法直接通过视觉感受红外辐射,所以红外辐射被有些人称为看不见的“光线”。

(2) 透烟雾性 可见光波长由于比红外辐射的波长短,所以易受空气中烟雾的阻挡,而红外辐射却能很好地透过烟雾。

(3) 色彩丰富性 可见光的最长波长比其最短波长大一倍,所以也叫做一个倍频程。按同样方法可以算出红外辐射有10个倍频程。如果可见光1个倍频程中有7种颜色,那么可推论出红外辐射具有70种颜色。由此可以说明,对红外辐射色特性的分析,可以得到设备热状态的更细微的区分。

有关红外辐射研究的理论,简要介绍如下。

一、红外辐射定律

(一) 基尔霍夫(Kirchhoff)定律

在介绍基尔霍夫定律之前,首先介绍有关黑体(Black-body)的概念。

实验表明,物体表面的温度不同,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,它对红外的辐射率、吸收率与表面温度及波长无关,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,就称为黑体。

实际上黑体并不存在，一切物体的辐射率和吸收率都小于 1，并且它们的辐射或吸收红外的能力都与表面温度及红外辐射的波长等因素有关。

在理论研究和工程实践中，常用物体的发射率来定量地描述物体辐射或吸收红外的能力，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。

$$\varepsilon = I/I_b$$

式中 I ——物体辐射强度；

I_b ——黑体辐射强度；

ε ——物体的发射率。

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

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密度可用下面公式表示：

$$w_\lambda = \alpha w_b$$

式中 w_λ ——物体在单位时间内红外辐射的能量密度；

w_b ——黑体在同一温度下单位时间内红外辐射的能量密度；

α ——物体对红外辐射的吸收系数，它总是小于 1。

显然，黑体是最理想的辐射体和吸收体，它的吸收系数和辐射系数都等于 1。此外，当物体处于红外辐射平衡状态时，它所吸收的红外线能量总恒等于它所辐射的红外线能

量。

根据这一定律还可推断出，性能好的反射体或透明体，必然是性能差的辐射体。因此，光滑的表面能够很好地反射红外线，但它在同一温度下比其他物体辐射红外线的能力就差得多。在实践中，增加物体辐射红外线能力的常用方法，就是使它的表面具有最小反射红外线的能力。

(二) 斯蒂芬-玻耳兹曼 (Stefan-Boltzmann) 定律

这是一个描述物体辐射红外线能量与它的温度之间关系的定律。它是由斯蒂芬在实验中发现，由玻耳兹曼从理论上加以证明。

斯蒂芬-玻耳兹曼定律指出：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，并与它的表面发射率 (ε) 成正比。如果用 W 表示单位时间和单位面积物体的红外辐射总能量，那么这一定律可以用下面公式表示：

$$W = \sigma \varepsilon T^4$$

式中 σ —— 斯蒂芬-玻耳兹曼常数，其数值为 $5.6696 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ；

ε —— 物体表面发射率；

T —— 物体热力学温度。

由这一定律可以看出，物体的温度愈高，它所辐射的红外能量愈大。应用这个定律可以估算出正常人体皮肤的平均温度为 30°C ，其表面面积为 1.2m^2 时，它的红外辐射能量接近于 0.6kW 。这是一个相当大的数字。不过人体在辐射红外辐射能量的同时，还从周围物体吸收红外辐射能量，所以人体真正向外界释放的净功率，远小于这个数值。

(三) 维恩 (Wien) 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。通常人们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, 称为维恩位移定律。

$$\lambda_{\max} = \frac{2897}{T}$$

式中 T ——黑体温度, K;

$\lambda_{\max}$ ——峰值波长, μm 。

从上式可看出, 在实际可达到的温度下, 峰值波长位于红外区域, 温度为3000K时, 峰值波长在可见光谱范围之外, 靠近波长 $\lambda = 0.96\mu\text{m}$; 当温度为5000K时, 峰值波长落到可见光谱的黄绿部分, $\lambda_{\max} = 0.577\mu\text{m}$ 。可见, 随着温度的升高, 峰值波长变短。

二、红外辐射的传输

红外辐射既然是一种电磁波, 那么它和其他波长的电磁波一样, 它可以在空间(真空)和一些介质中传播, 但是在传输方面它还有自己的特点。

(一) 红外辐射在大气中的传输

地球周围的大气主要由氮和氧组成, 此外还有少量的水蒸气、二氧化碳和其他成分气体。实验表明, 当红外辐射在大气中传输时, 它的能量由于大气的吸收而衰减。大气对红外辐射的吸收与衰减是有选择性的, 即对不同波长的红外辐射吸收与衰减的程度有很大的差别。如对于某些波长的红外辐射, 大气几乎全部吸收, 就像大气对这种波长的红外辐射完全不透明一样; 相反, 对于另外一些红外辐射, 大气又几乎一点也不吸收, 就像完全透明一样。

大气对红外辐射的吸收，实际上是大气中的水蒸气、二氧化碳、臭氧、氧化氮、甲烷和一氧化碳等气体的分子，有选择地吸收一定波长的红外辐射。这些气体分子的红外吸收带中心波长如表1-1所示。

表 1-1 某些气体分子吸收带中心波长

气 体 名 称	吸 收 带 中 心 波 长 (μm)							
水(H_2O)	0.9	1.14	1.38	1.87	2.7	3.2	6.3	
二氧化碳(CO_2)	1.4	1.6	2.0	2.7	4.3	4.8	5.2	15
臭氧(O_3)	4.5	9.6	14					
氧化氮(N_2O)	4.7	7.8						
甲烷(CH_4)	3.2	7.5						
一氧化碳(CO)	4.8							

由于上述气体只对一定波长红外辐射产生吸收，所以就造成了大气对不同波长的红外辐射具有不同的透过率。实验表明，能够顺利透过大气的红外辐射主要有三个波长范围，即 $1\sim 2.5\mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 。因此，可以形象地把这三个波长范围叫做大气窗口。但是，即便是这三个波段的红外辐射，在大气中传输时还会有一定的能量衰减，并且衰减的程度与大气中存在的杂物、水分有密切关系。

(二) 红外辐射在一些介质中的传输

普通玻璃能透过可见光，但它却几乎不能透过红外辐射。所以许多对可见光透明的介质，对红外辐射却是不透明的。下面介绍一下红外辐射在介质中的传输过程和性能。

通常把可以透过红外辐射的介质称为红外光学材料。事实上，任何介质不可能对所有波长的红外辐射都透明，而只是对某些波长范围的红外辐射具有较高的透过率。因此，在谈

到某种红外光学材料时，必须说明它所透过红外辐射的波长范围。

红外光学材料按它的结构、性能和制备的方法，可分为三大类，即晶体材料（包括单晶和多晶材料）、玻璃材料和塑性材料。

下面介绍几种在红外诊断技术中常用的红外光学材料及其传输红外的性能。

1. 单晶锗

它是一种最常用的红外光学材料，可以作红外仪器本体与大气隔离开的窗口，也可以用它磨制各种透镜、棱镜。

单晶锗的制备多采用拉单晶的方法，不过它的直径比一般拉制的单晶要粗，直径可达200~250mm。用作红外光学材料的单晶锗，一般采用低阻型（电阻率小于 $30\Omega\cdot\text{mm}$ ），它对波长为 $1.8\sim 20\mu\text{m}$ 的红外辐射有较良好的透过率，但它的最大透过率（指它的表面不加任何处理时的透过率）约为44%。如果采用在其表面镀以增透膜的工艺处理，则可使它对一定波长的红外辐射具有很高的透过率，最高可达99%。

单晶锗的另一个主要光学参数是折射率。在 $1.8\sim 16\mu\text{m}$ 范围内，单晶锗的折射率为 $4.143\sim 4.001$ 。

2. 单晶硅

它也是一种常见的人工单晶材料，其用途和制备方法与单晶锗相似，它的价格比单晶锗略低，但它只适用于透过波长在 $11\mu\text{m}$ 以内的红外辐射。其折射率为3.4。

3. 多晶氟化钙

它是一种热压成型的多晶红外光学材料。它可透过波长为 $0.25\sim 10.5\mu\text{m}$ 的红外辐射，透过率可高达90%左右。其