

红外热像 检测与诊断技术

李晓刚 付冬梅 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是作者所领导的课题组在承担了大量来自国家自然科学基金、国际合作和企业横向项目研究的基础上编写而成的。在总结红外热像检测与诊断技术进展的基础上,主要内容集中在红外热像图处理、红外热像处理软件系统、工业加热炉炉管安全评定和剩余寿命评定方法及相应数据库的建立、工业设备保温评定及相应数据库的建立、带衬里工业衬里损伤及相应数据库的建立、电器设备损伤及相应数据库的建立、红外热像检测与诊断技术相关理论及其工程应用与标准化等方面。本书是作者在以上方面系列化成果的反映。同时,本书还涉及到了红外热像检测与诊断技术的定位技术和其他高温高压设备的红外热像检测与诊断技术。

本书主要供科研院所和高等学校从事红外热像检测与诊断技术研究的专业技术人员、厂矿企业从事设备管理的技术人员和管理人员阅读,也可以作为高等院校高年级学生或研究生的教学和科研参考书。

图书在版编目(CIP)数据

红外热像检测与诊断技术/李晓刚,付冬梅著. —北京:
中国电力出版社, 2006
ISBN 7-5083-4358-1

I. 红... II. ①李... ②付... III. 红外技术
IV. TN21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 044488 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 7 月第一版 2006 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14 印张 318 千字 4 彩页

印数 0001—3000 册 定价 28.00 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)

作者简介

李晓刚

博士，男，1963年10月出生，湖北广水市人。北京科技大学材料科学与工程学院副院长、试验中心主任、腐蚀与防护中心教授、博士生导师；兼任国家自然科学基金会材料环境腐蚀试验网站办公室主任；北京市腐蚀、磨损与表面技术重点实验室副主任。主要研究方向为材料环境腐蚀数据积累与共享、材料腐蚀行为与机理和红外热像检测。目前是国家科技平台建设项目“国家材料环境腐蚀野外台站建设与共享”负责人。完成国家自然科学基金、省部级和国际合作项目三十多项，来自生产一线项目百余项。指导博士研究生30名，硕士研究生30多名。获省部级科技进步奖六项。在国内外发表研究论文200多篇。

付冬梅

博士，女，1963年1月出生，辽宁大连市人。北京科技大学控制理论与控制工程专业教授。主要研究方向为红外图像技术与应用、人工免疫理论与应用和智能数据分析与软件设计。完成国家自然科学基金、省部级和国际合作项目十多项，来自生产一线项目二十余项。指导硕士研究生十多名。获省部级科技进步奖两项。在国内外发表研究论文30多篇。

前言

1987年4月作者分别从西北工业大学材料科学与工程学科和自动化学科硕士毕业,来到了辽宁抚顺这个我国的重工业基地工作。在面临今后长期的科学研究方向选择时,作者根据自身的专业基础、周围工作环境和学科发展需求,将红外热像检测这个当时的新兴工业在线检测技术作为自己的主要研究方向。不曾想这一选择却见证了我国工业红外热像检测技术的早期发展历史:从20世纪80年代中期我国花费巨额外汇大量进口了国外各种型号并不先进的热像仪,到如今我国自产的非致冷焦平面热像仪堪与国外先进红外热像系统媲美;从早期我国电力、石化、冶金等工业行业红外热像检测技术的经验积累,到如今我国工业红外热像检测技术向规范化、标准化方向发展的全过程。同时,见证了众多的各级领导、现场工程师、科技人员和研究生们,甚至企业家和商务工作者们对我国这一技术发展的贡献,作者为我国这项技术的快速发展感到自豪。

温度是自然界中物体状态最普适的参数之一,而红外热像反映的是物体表面的温度分布,因此,红外热像作为检测物体状态的手段,具有很广泛的适用性,是红外热像检测的最大特点;红外热像检测的第二个特点是非接触式测量,从遥远的星球撞击温度到近在咫尺的物体表面温度,它都可以通过非接触的辐射方式测量获得,这也是红外热像检测的最大优势。红外热像技术发源并成熟于军事应用,在各种作战中发挥了巨大的威力,到目前仍然是不可替代的作战手段。工业红外热像检测技术来自军事红外热像技术,它们具有很多相同的特点。但是,两者的区别在于工业红外热像检测技术需要强大的后处理软件系统,需要定量处理的场合远远多于军事场合;军事检测的随机性和偶发性多于工业检测,而工业红外热像检测的优势之一在于可以进行相同部位、相同路线、相同时间、相同仪器等多种相同方式的连续重复对比检测,并从一系列对比的结果中对设备状态进行诊断,军事应用领域很难做到这一点。

从20世纪60年代开始,红外热像技术在工业中得到广泛应用,显示出巨大的活力。十多年来,作者将主要的研究精力投入到这方面的研究中,并逐渐建立了相关的研究课题组。课题组人员由材料、机械、计算机与自动化等专业人员构成,一直致力于工业红外热像检测技术的研究工作,承担了大量来自于工程一线的项目。在开展这些项目的过程中,课题组在红外热像图处理、红外热像处理软件系统、炉管安全评定和剩余寿命评定方法及相应数据库的建立、保温评定及相应数据库的建立、衬里损伤及相应数据库的建立、电器设备损伤及相应数据库的建立、相关理论及其工程应用等方面做了系列化的研究工作,本书是这些工作的一个侧面反映。希望本书对发展红外热像检测与诊断技术有一定的促进作用。

课题组的主要成员先后有：仲跻生高工、刘占民副教授、盖建武硕士、李春诚高工、丁有发高工、陈盛军工程师、姜凯工程师、董超芳副教授、罗德贵工程师、李明博士、张红博士、聂向晖博士、张丽英硕士、韩国祥硕士、陈英硕士、韩晓萍硕士、张雪松硕士、张志彦硕士、陈国群硕士，以及数十位在此无法一一列举姓名的本科毕业生。他们都参加了本书的工作，大量的实际检测工作和程序编制工作主要依赖他们完成，作者时常回忆起与他们一起到工矿企业进行实际检测工作的美好时光。本书其实是大家共同劳动的结晶，在此向他们致以深深的感谢！先后大力支持本研究方向的领导与专家有：许适群高工、柯伟院士、汪申高工、贾鹏林高工、代有凡高工、韩恩厚研究员、Howard Chiang 高级工程师、Min Chen 博士、Boyd. A. George 高级主管、杜振军工程师、高金吉院士、孙桂大教授、刘小辉高工、龚宏教授、黄昭毅教授、沈水福教授、王国璋高工、范武亭经理、吴继平总经理、吴小松硕士等；吴俊升博士、李磊硕士和王炜硕士在本书的编写过程中给予了作者大力支持，作者在此一并致谢！

北京科技大学材料科学与工程学院教授、博士生导师

李 晓 刚

2005 年 12 月

目 录

前 言

第一章 概述	1
第一节 红外热像检测技术及其发展	1
第二节 红外热像检测技术在石化行业的应用	9
第三节 红外热像检测技术在冶金行业的应用	15
第四节 红外热像检测技术在电力行业的应用	17
第五节 工业红外热像检测技术的标准化	24
第二章 红外热像图处理及其软件系统	35
第一节 红外图像 IMG 编码破解及成像文件格式	36
第二节 红外图像的色彩处理	48
第三节 红外图像边缘检测	54
第四节 优化红外热像图形的软件系统与实现	61
第五节 基于框架的红外图像及分析数据的保存方法	66
第六节 红外热像温度分析软件系统使用报告	70
第三章 带衬里工业装置的红外热像检测与诊断	82
第一节 带衬里热设备红外检测与诊断的温度限分析与软件系统	82
第二节 催化裂化装置衬里损伤的红外热像检测与诊断	91
第三节 冶金企业钢包和中间包衬里材料损伤红外热像检测与诊断	95
第四节 加热炉炉墙衬里损伤的红外热像检测与诊断	108
第四章 工业装置保温效果的红外热像检测与评估	115
第一节 工业装置保温效果的红外热像检测与评估系统软件	115
第二节 长距离管线的红外热像检测与在线保温评估	123
第三节 统计分析方法在红外热像保温评估中的应用	126
第五章 加热炉炉管在线红外热像检测与诊断	131

第一节	加热炉管规范管理与在线剩余寿命评估系统	132
第二节	焦化加热炉炉管的红外热像检测与诊断	141
第三节	用红外热像技术在线评定原油加热炉管剩余寿命	151
第四节	用红外热像技术在线评定常减压炉管剩余寿命	154
第五节	裂解炉管表面温度场的红外热像检测与评估	157
第六章	电器设备故障红外热像检测与诊断	160
第一节	基于相对温差法的电器设备故障红外诊断软件系统	160
第二节	变电站电器设备表面温度场红外热像检测与评估	163
第三节	基于温度信息的变压器故障模糊诊断的概率方法	165
第四节	变压器故障的红外热像模糊诊断与实现	169
第七章	加氢反应器红外检测及红外检测定位技术	190
第一节	加氢反应器在线红外热像检测与安全评定	190
第二节	工业红外热像检测与诊断中定位技术研究	193
附录	工业检测型红外热像仪	201
参考文献		213
后记		217

第一章

概 述

第一节

红外热像检测技术及其发展

一、红外热像图原理与特点

1. 红外热像图原理

红外热像技术是利用红外探测器将不可见的红外辐射转换成可见图像的一种技术。红外热像检测技术是利用红外图像对设备表面温度场进行测定，进而评估其状态的一种技术。热成像技术的发展与红外探测器技术的发展密切相关，红外探测器技术的发展经历了从单元到多元、致冷到非致冷的发展过程，探测技术的每次进步都在不同程度上推动了热成像技术从一个台阶跃进到另一个新高度。

20 世纪 60 年代以后，出现了工作于 $3\sim 5\mu\text{m}$ 、 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段的多种红外探测器，其性能可以满足热成像技术的基本要求，因此使热成像技术开始得到飞速发展。早期出现的热像仪为单元型，它的扫描速度极低，实时性差，不能得到活动目标的图像，在应用中受到限制。为解决这一问题，出现了多元探测器热成像技术，其所采用的扫描方式为串扫、并扫。但探测元的数目不可能无限增加，因为它会影响到 NETD（噪声等效温差）性能的提高，一般认为此时的探测器元数不应超过 200，称这时的成像设备为第一代热像仪。第二代热像仪的出现是以红外焦平面的使用为标志，红外焦平面是探测器制造技术和大规模集成电路结合的产物，它有效地提高了热像仪设备的探测性能，改善了成像质量。

热成像技术的发展动力主要来自于军事应用和民用。在军事应用方面，要求热成像设备具有快速响应、输出电视型图像以及具有较高的温度灵敏度和较高的空间分辨率，以满足武器系统的各种技术要求。其应用包括夜视系统、瞄准系统、制导系统等方面。在民用上，由于热像图反映了目标红外辐射的强弱，而红外辐射直接与温度有关，因而可以利用热像仪测量物体的温度。从民用上来看，热像仪可以用来进行故障检测、质量监控、疾病诊断等。

上世纪 90 年代中期，随着非致冷红外焦平面技术取得重大突破和实用化，使其与致冷红外热像仪相比具有低成本、低功耗、长寿命、小型化和可靠性高等优点，使红外热像技术以前所未有的广度和数量应用于军事和国民经济各领域。目前，应用该技术从事红外热像仪开发的公司主要有美国红外前视（Flir）公司、Amber 公司、Texas 仪器公司等，已经开发出的产品有各种类型的非致冷红外相机（包括微测辐射热计红外焦平面和铁电探

测器红外焦平面型)。美国 HoneyWell 公司在非致冷微辐射热计红外焦平面阵列制造技术方面取得重大突破,使红外系统能够实现在各领域中的广泛应用,因此非致冷微测辐射热计红外成像技术成为发展的重点之一。

红外检测的基本理论是基于热辐射的普朗克定律,即利用物体的辐射能与温度的关系进行检测的一种方法。它通过扫描、记录被测试件表面上由于缺陷和材料不同的热特性而引起的温度变化来进行红外检测。

由斯蒂芬—玻尔兹曼定律可知,当一个物体表面的发射率 ϵ 不变时,该物体的辐射功率与其温度的四次方成正比。因此,对物体辐射功率的探测,实际就成了对物体表面温度的探测。

当一个物体的几何形状、热特性参数、测量条件、内部缺陷、位置形态及热特性等条件确定后,就可以在理论上确定红外检测的依据:将一固定热量 q 加在物体表面时,热流将均匀地注入其表面,并扩散进入内部,扩散速度由被测物体内部性质决定。如果物体内部有缺陷存在,则均匀热流就被缺陷阻挡(热阻),经过时间延迟,在缺陷部位发生热量堆积,并在物体表面产生过热点,表现为温度异常。利用红外仪器扫描物体表面,测量物体表面温度分布情况。当探测到过热点时,就可以断定出现过热点的表面下方存在异常。

热量注入后,出现最大温差所需要的时间是一个很重要的量。可以根据加热时间和加热结束后测量温度之间的延时时间控制热量注入物体的深度。对于不同材料,不同深度的缺陷,延时时间是不同的。对于非金属材料或缺陷在深处的情况,较长时间的延迟可以在温度测量之前使得注入的热量进入较深的部位,而对于金属材料或近表面缺陷,只需较短时间的延时,就可以进行温度测量。红外检测缺陷的分辨率根据材料的热特性及结构而定。分辨缺陷的能力随缺陷在材料内部深度的增加而减小。这是由于缺陷上方的材料把形成热点的热量扩散,从而使热梯度减小的缘故。

可根据材料性质和具体情况选择适当的热注入方式,一般采用非接触法注入热量。如将物体恒温后,把它放入一个低于(或高于)其恒温温度值的环境中检测,若物体中存在有脱粘、裂纹、空洞等缺陷,则内部的热流在向外流动时,因受到缺陷的阻挡,在表面就会出现一个温度较低的点,同没有缺陷的部位相比较,建立温度梯度,利用红外仪器扫描物体表面,就能探测到缺陷。相应地在热像仪荧光屏上出现一个相应的暗影。

红外检测技术在航天、航空领域有较为广泛的应用,它主要用于多层结构和蜂窝结构的检验。美国洛克西德公司利用红外横移检测仪(TIRIS)检验大面积 C-5 飞机破损安全条板,该条板由 0.5mm 厚的钛合金板和 3.2mm 厚的铝合金板胶结层压而成。该仪器主要用于检验渗入铝蜂窝中水滴和检验复合材料的结构,能检验出大于 $\phi 7.6$ 的脱黏缺陷,并记录热像图。利用热像图可清晰地表明脱黏缺陷和分层的面积。在我国也已经利用红外检测技术检查多层胶结结构,工件是由钛合金板、非金属材料 I、非金属材料 II、非金属材料 III 胶结而成,其中材料 I 的厚度为 5~15mm,材料 II 的厚度为 1~2mm,材料 III 的厚度大于 60mm,钛合金板的厚度为 2~5mm。检查时,先将工件恒温加热,扫描工件表面,记录工件表面沿扫描线的温度分布(见图 1-1)。

检查结果表明,采用 TVS2000 红外热像仪用该方法能探测到钛合金板与非金属材料

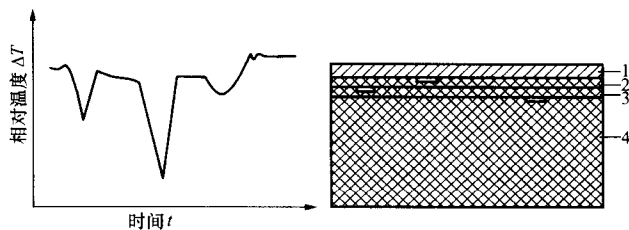


图 1-1 多层结构检查记录曲线

1—钛合金板, 厚 3mm; 2—非金属材料 I, 厚 2mm;
3—非金属材料 II, 厚 2mm; 4—非金属材料 III, 厚 60mm

I 之间界面脱粘的最小面积为 $10\text{mm} \times 15\text{mm}$; 非金属材料 I 与非金属材料 II 之间界面脱粘的最小面积为 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$; 非金属材料 II 与非金属材料 III 之间界面脱粘的最小面积为 $30\text{mm} \times 30\text{mm}$; 由记录曲线幅度和变化趋势判断缺陷, 其典型的记录曲线见图 1-1。经解剖证明, 利用红外检测技术还可以检查材料内部夹杂、分层、疏松及厚度不均等缺陷。

红外热像仪的工作原理方框图如图 1-2 所示。红外热像仪是利用红外探测器、光学成像物镜和光机扫描系统(目前先进的焦平面技术已省去了光机扫描系统)接受被测目标的红外辐射信号, 一般是由光学系统收集被测目标的红外辐射能, 经过光谱滤波、空间滤波使聚焦的红外辐射能量分布图形反映到红外探测器的光敏元件上。在光学系统和红外探测器之间, 有一个光机扫描机构(焦平面热像仪无此机构)对被测物体的红外热像进行扫描, 并聚焦在单元或多元探测器上, 探测器将红外辐射能转换成电信号, 经放大处理转换成标准视频信号, 通过电视屏或监视器显示红外热像图。这种热像图与物体表面的热分布场相对应, 实质上是被测物体各部分红外辐射的热像分布图。

被测物体发出的红外辐射由光学成像扫描系统接收。光学成像扫描系统是通过感光面小于 0.2mm 直径或边长的光电探测器, 将所看到的只有几个毫弧度的景物, 从左到右、从上到下地对物体一次扫描探测, 将物体分解成一个个像元, 并将分解的被检测设备的热像性质、程度和位置的像元依次采入, 在小于 0.2s 的时间内转换成不同明亮度的、连续逼真的图像, 再送入显示器显示。

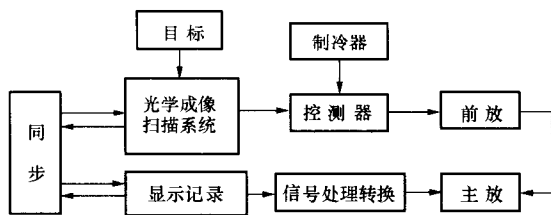


图 1-2 红外热像仪原理框图

红外探测器是红外热像仪的关键部件, 它是一个辐射能转换器。工作时将被测目标和红外辐射经快速扫描, 由红外探测器的敏感元件(单元式或阵列式)接收, 并进行光电转换, 产生与目标变化相对应的信号电流, 送入电子放大系统处理、放大。“信号处理与转换”、“显示与记录”是实现红外测温 and 显示的电路装置, 它能将 $-40 \sim 2000^\circ\text{C}$ 温度下发出的不同波长的红外线, 做等温显示或亮暗反转显示等。信号送入处理与转换系统, 最后由显示和记录系统完成全部工作环节。

显示方式采用彩色或黑白显示,由于红外辐射是看不见的热线,所以,彩色显示并非真实地反映被摄物的自然色彩,而是热像图中同一个信号电平的模式。这里的彩色显示实际上是采用等密度分层的“伪彩色”处理。

2. 红外热像图特点

红外热像仪是把物体表面的红外辐射转换成可见图像的装置,其最终表达形式是红外热像图。红外热像图可以直观地显示被测目标表面的红外辐射温度场分布。以凝视型红外焦平面技术为代表的第二代的红外热像仪,像元的数目不断增加,温分辨率也越来越高,目前最高的温度分辨率达到了 0.01°C 。对于这样高性能的红外产品,除了原来简单的红外侦察或观察应用外,科研工作者已经把它的的应用范围拓展到了几乎所有与表面温度有关的科学研究领域中,并对红外热像图的量化分析提出了更高的要求。用红外热像仪采集的红外图像有如下特点:

(1) 红外图像的灰度分布,对应于目标和背景温度和,以及物体表面发射率的分布。红外成像导引头只能从红外特有的图像中抽取所需信号。数字图像中可利用的基本信息是以像元强度形式出现的。

(2) 实际目标检测、识别与跟踪过程,是在背景噪声环境中进行的。因此,统计图像识别十分重要。红外图像中最简单的模型是二值图像,即目标比近邻背景暗和亮的两种情况。目标特征提取主要考虑目标的各种物理特征,如目标形状、大小、统计分布、运动状态等,常常不考虑目标细节。

(3) 由于红外图像摄取的帧数在 $25\sim 70\text{fr/s}$ 之间,目标表面的辐射分布在两帧之间基本上保持不变,这个性质为逐帧分析目标特征和对目标定位提供了保证。

(4) 由于红外图像处理方法建立在二维数据处理和随机信号分析的基础上,其特点是信息量大,因而计算量和存储量大,红外成像制导信息处理必须实时、快速、简单、可靠。大容量信息存储和高速信息处理技术与方法,始终是制约信息处理的技术关键。

(5) 要求根据具体目标、任务、具体作战条件及背景、干扰情况,设计占计算机容量小、快速而有效的算法。

(6) 边缘效应的差异。可见光图像的边缘要比红外图像的边缘“陡”得多,由于可见光图像边缘的奇异性,往往在边缘的两侧出现过冲,或者其边缘既陡又高。而红外图像的边缘相对平滑一些,但边缘结构比较复杂。

(7) 纹理特征不同。可见光图像能反映出目标表面的纹理细节信息,有纹理信息可以利用。而红外波段的固有分辨率及其在传输过程中受大气吸收和散射作用影响,使得红外图像很难反映出目标表面的纹理信息,所以目标的红外图像几乎无纹理信息可用。

(8) 像素间的相关性不同。实际景物图像的像素之间存在着一定的相关性,而这种相关性可以用图像像素的自相关系数 p 来表示。自相关系数 p 是近似指数型的,图像像素间的距离越远,其相关性越差。因此,定义了一格相关长度的概念,即自相关系数在某一方向上降到 $1/p$ 时的像素间的距离称为图像的相关长度。实际结果表明,同一景物的红外图像相关长度要比不可见光图像的相关长度要长一些。

与可见光图像各项指标进行对比,红外图像的优、缺点总结如下。

优点:

(1) 目标和背景的红外图像感受和反映的是目标及背景向外辐射能量的差异,或者说它描述的是目标和背景所保持温度的差异,属于被动成像,可以全天候工作。

(2) 红外辐射透过霾、雾及大气的的能力比可见光强。它可以克服部分视觉上的障碍而探测到目标,具有较大的作用距离和较强的抗干扰能力。

(3) 红外波段的固有分辨率以及在传输过程中受大气吸收和散射的作用,使得红外图像缺乏较好的对比度和分辨率,很难反映出目标的纹理信息,同时也使得红外图像的像素之间具有良好的空间相关性,图像的灰度均值保持相对稳定,含有较多、较大的同质区。

缺点:

(1) 像素分辨率较低,多采用插值显示。在红外热像图中,一般 H (水平) 向和 V (垂直) 向只有几十到上百个像素,本章中的红外热像图为 $H \times V = 160 \times 120$ 像素,随机附带的软件对红外热像图的数据进行了插值,可显示为 $H \times V = 320 \times 240$ 像素。插值显示的方法,增强了图像的美观性,但从某种程度上丧失了部分数据的真实性质。

(2) 对比性较差,过渡较强,物体表面温度差较小是主要原因;另外在测试时所选定的温度区间及伪彩色显示区段也各不相同。所以在色彩标示上,为了适应图像的可视性要求,采用了较强的过渡彩显示形式,层次性不好。

(3) 图像边缘模糊,温差区间界限不明显。红外探测器的像元数目少,图像的分辨率较低是主要原因,而仪器追求图像美观等商业化的显示模式是另外一个原因。

(4) 图像文件格式特殊,不通用。红外热像图的图像格式是由经营红外热像仪的厂家或商家制定的,它通常是“量身定做”的,文件格式比较特殊。这通常与仪器采用的图像采集、传输、存储、显示及处理软件有密切关系,如果没有专门的图像处理软件就无法看到红外热像图,更谈不上数据分析,这势必影响数据流通和传递。

国外早期主要在热像仪上直接进行功能单一的图像分析,如伪彩色编码。而目前国外功能强大、测温精度高的图像分析软件是借助于热像仪和笔记本电脑组成一个分析系统来进行图像分析,其中红外摄像机是用来对热目标的观测;笔记本电脑一方面完成对摄像机工作状态的调整,另一方面将摄像机传来的热像图进行图像分析和处理。

我国研究开发红外热像仪技术起步较晚,发展速度也相对较慢,使得用于热像仪的为数很少的图像分析软件的技术也相对滞后。前十年国内大部分热像图分析软件主要针对致冷型传感器的热像仪,而且在 DOS 操作系统中运行。少数图像分析软件用于非致冷型热像仪,但它们的图像分析功能较为单一,测温精度较差。近十年来,随着现代可视化操作系统的发展,要求开发新的可视化软件来支持这种信号处理。国内对非致冷红外焦平面热像仪的开发处在起步阶段,同时对非致冷红外热像仪图像进行分析和处理软件的开发也取得了较大进展,达到了与国外仪器软件系统水平相当的综合水平。

红外热像技术在现在和未来的军事、民事中都有着非常重要的战略战术地位和作用,由于种种原因,国内在这些方面还比较落后,国外对我们又都是保密和禁运的。因此只有通过自身的努力来发展我们自己的红外技术及系统。而非致冷微测辐射热计红外焦平面阵列 (UMBIRFPA) 是当代信息科学技术中红外技术学科的具有带动性的学科研究前沿,

正主导着下一代红外和相关科学技术的发展，在国际上已列为信息科学技术的关键领域之一。它涉及多学科的高新技术，有重要的理论意义和应用价值。涉及的方向包括红外材料的研制、微机械加工技术、低功耗信号读出技术、信号处理技术、红外成像技术、器件封装技术等，涉及到红外技术、固体图像传感器技术、微电子技术、微弱信号处理技术、计算机辅助设计技术、分析和测试技术等多学科领域知识。

目前红外热成像系统突出的性能优点还远没有得到充分发挥。因此，国内外在开展红外探测器和红外热成像系统性能研究的同时，也在进行红外图像实时处理技术的研究。其核心任务是研制模块化红外图像实时处理系统，有效地提高红外热成像系统的动态范围、抑制图像噪声、增强图像信息、消除非均匀性和改善图像质量等。非均匀性校正、图像增强、对比度增强是红外图像处理技术的三个主要方面。非均匀性校正技术可分为线性校正技术和非线性校正技术两类。线性校正假设探测器单元的响应呈线性，它又分为基于参照元的校正技术和基于场景统计的校正技术。基于参照元的校正是目前最为成熟并且已经实用化的技术，这种技术使用不同温度的参照元输入和探测器单元对输入的响应输出作为线性插值的零点，来计算增益因子和偏移因子。国内外已有大量文献对基于参照元校正的校正性能、实现方法、校正结果评价等内容进行了论述和报道。基于场景的线性校正则是目前正在积极探索的技术。它与基于参照元的线性校正不同之处在于计算增益因子和偏移因子的数据不是取自参照元，而是全部或部分来自基于场景的估计，因此可以省去参照元使系统简化。其中以 CS (Constant-Statistics) 算法最具代表性。为了解决凝视型焦平面系统的非均匀性而又能不使用参照元，目前正在积极探索各种非线性校正方法，其中 BP 神经网络校正技术应用最为广泛。

在红外图像增强方面，主要包括图像去噪和图像细节清晰化。红外图像的噪声可分为两类：散粒噪声和高斯噪声。消除散粒噪声的有效方法是帧内中值滤波。非线性的中值滤波器是边沿保护滤波器。为使中值滤波能更好地保护边缘，目前更多地使用加权中值滤波和其改进形式。中值运算有很多快速算法，但就硬件实现而言，流水线冒泡排序算法是较为实用的方法。图像细节清晰化主要通过图像边缘增强来实现。边缘增强，即先对图像进行边缘检测，再将边缘上像素的灰度乘以一个大于 1 的系数。传统的边缘检测算法很多，最为简单有效的如 Sobel 算子等，其模板用硬件实现也较为简单。目前人们正积极研究非线性滤波技术、基于模糊理论的红外图像滤波技术、基于小波变换的红外图像去噪技术等。

二、红外检测方法分类

红外检测按其检测方式可分为主动式和被动式两大类，其分类及特点见表 1-1。所谓主动式红外检测是指将人为产生的特定波长的红外光照在被测物体上，再利用红外光接收仪接收物体表面反射的特定波长的红外光，从而构成物体的像。这种检测方法几乎无异于可见光的成像过程，这不是本书讨论的内容。所谓被动式红外检测是不需要外界红外光源的，它利用带温度的物体表面发射出的红外线来成像，因此其形成的图像是物体表面温度场的影像。这才是本书所指的红外热像图。如果未加特殊说明，本书所指的红外图都是指这种红外热像图。

对于被动式红外热像图的获取可进一步分为驱动式被动红外热像图获取和自然式被动红外热像图获取。其分类及特点见表 1-1。驱动式被动红外热像图检测是在人工加热工件的同时或在加热后,经过一定时间的延时后扫描记录或观察工件表面的温度分布。自然式被动红外热像图检测是利用工件自身的温度不同于周围环境的温度,在待测工件和周围环境的热交换过程中显示工件内部的缺陷,也用于监测设备的运行情况及能耗监测,美国在 20 世纪 80 年代就有报道其在能耗监测及设备运行监测中的应用。驱动式被动红外热像图检测又分为单面法和双面法。单面法是指加热和探测在工件的同一面进行,用辐射计或热像仪扫描记录加热后的工件表面温度分布。双面法是指在工件的一个表面进行加热,而在其背面(另一个表面)进行观察或记录温度分布。

表 1-1 被动式红外热像图检测方法分类

被动式红外热像图检测方法		检 测 特 点
驱 动 式	单 面 法	能够确定缺陷所处的深度
	双 面 法	能给出高的缺陷显示度
自 然 式		利用检测目标自身温度的热辐射,不需加热源,多用于运行中设备、工件、电子元器件的检测

红外检测按加热方法可分为稳态和非稳态。稳态法是将待测工件加热到内部温度均匀恒定状态,例如用恒温箱可将待测工件恒温加热到任意选定的温度,使用外部热源将工件在自然环境中加热到某一稳定温度。非稳态法是指加热时,工件内部的温度不是均匀恒定的,工件内部有热传导存在。

三、红外热像检测技术的发展与应用

红外热像技术是在军事领域中应用发展起来的,现在已在世界各国的多个行业都有广泛的应用。日本应用红外热像技术最为广泛,除大量工业上的应用外,甚至在赛马场上也应用了该技术;美国在建筑业中大量应用红外热像诊断;英国的玻璃制造业在 1969 年就开始使用红外热像技术;意大利将该技术用于能量管理;加拿大用于定量测试表面热损耗等。他们都对红外热像技术给予了高度的评价,该技术的应用正受到越来越多的重视,并且向更深、更广的方向发展。红外热像技术的优越性是比较多的,它的非接触测量对于许多无法接近的目标,如远距离目标,高速运行中的设备,放射性环境中的设备,高温、高电压设备等均可测试;它的响应速度快,可以动态监视各种启动、过渡过程中的温度变化;它的灵敏度高,可分辨被测物体的微小温差;它的测量范围广,从零下几十摄氏度到零上两千摄氏度都可测量,可适用于多种检测目标。

红外热像技术经历了早期由军用到民用的转变。在工业部门最早应用是 20 世纪 60 年代中期瑞典国家电力公司生产出 AGA 系列热像仪,并用这种热像仪对电网系统进行巡检,取得了巨大的成功。从此,红外热像检测技术在世界各国电力及其他工业部门逐渐开始广泛应用。1989 年美国国家标准局制定并公布了首个红外热像技术标准。1990 年国际大电网会议对红外热像技术的倍加重视和肯定。1993 年美国动力会议广泛交流了红外检测在电力系统的应用,标志着红外电力检测技术的成熟。与此同时,红外热像检测技术在

包括工业领域的各个领域中得到广泛应用。

红外热像仪是 20 世纪 50 年代以后才逐渐发展起来的产品。随着电子技术的迅速发展,红外热像仪至今已发展到了第三代。第一代产品由于探测器元数少,所形成的信号不能在阴极射线管上形成图像,所以在光学系统中加一个机械扫描器,使探测器能接收视场中的景物,并形成图像。而第三代产品已不需扫描器,探测器也比第一代更复杂,性能提高许多,体积也缩小了。红外热像仪正在走向成熟,而且其价格正在降低。

我国的红外技术起步较晚,现与西方相比有 10 年左右的差距,红外热像技术更有 15 年左右的差距,20 世纪 70 年代上海第 11 和 211 技术物理研究所首先在这方面进行研究。80 年代初以来中国在长波红外元件的研制和生产技术有很大进展,目前自制长波单元碲镉汞 (HgCdTe) 元件的生产工艺较成熟,元件黑体探测度 D 可达 $(2\sim5)\times 10^{10}\text{cmHl}/2\text{W}$ 响应度达 104V/W ,能稳定量产,成品率相当高。中国科研部门在 80 年代后期终于突破了长波碲镉汞材料关键技术及元件生产工艺难关。1989 年研制出高性能 60 元线列元件,平均黑体 D 达 $2\times 10^{10}\text{cmHl}/2\text{W}$ 以上,响应度达 104V/W 。1990 年春运用该元件研制了与电视兼容的实时红外影像样机,灵敏度、空间和温度分辨率都达到很高的水准,它为我国红外热像技术奠定了基础。另外,自 80 年代中期开始研究双色红外亚成像。进入 90 年代以来,我国在红外热像设备上使用的低噪声宽频带前置放大器、微型致冷器等关键技术方面已有了很大的进步。1990 年以来,进展有加速的迹象,并走出实验室运用于现场检验及武器装备上,部分已进入部队服役。我国首台非致冷红外热像仪于上世纪初由华中光电研究所研制成功,立即投入批量生产。非致冷热像仪是一种集红外光学设计、镀膜与加工、精密机械制造、信号处理、图像处理、液晶显示及红外应用等多种技术于一体的高科技产品。新开发的非致冷红外热像仪可在室温工作,无需低温致冷器,使用寿命长、可靠性高、操作简便,可使用便携式充电电源工作,而且体积小、质量轻、功耗低。目前,先进的热像仪的温度分辨率可达 0.2°C (最好的可达 $0.05\sim 0.1^{\circ}\text{C}$)。当目标与背景温差大于 0.2°C 时,就可观察目标的轮廓;当目标自身部位温差大于 0.2°C 时,就可观察到目标的层次,利用这一温度分辨率可透过一定遮障来识别被测目标。近年来,通过国家一系列主体研制与生产单位和部分民营资本的共同努力,我国正在结束大量进口普通、较低标准的热像仪的历史,开始转而出口。

国内工业领域最早使用红外热像检测技术是 1975 年由上海引进第一台 AGA 红外热成像仪,为当时最先进的热像仪。80 年代平武电力工程引进三台 AGA 红外热成像仪,大大提高我国电力设备诊断水平。80 年代中期红外热像检测技术开始在我国电力、冶金、石油等工业部门的广泛应用。目前,大多数电力试验研究部门、电厂和供电部门配置了红外热成像仪,这些热像仪既包括各种类型的进口型号,又有各种国产的热像仪。由于红外热像检测技术在电力系统的广泛应用,并逐渐成为主要的电力故障诊断技术,1998 年国家制定了电力红外诊断导则。特别是在 2003 年的“非典”疫情中,红外热像检测技术在识别人群中较高温度者的实时测试中发挥了不可替代的作用,大大促进了红外热像检测技术在我国的应用。“非典”疫情过后,国家有关部门迅速组织各方面专家,制定并公布了我国第一个红外热像仪的国家标准,使我国红外热像检测技术突破多年的发展“胶着”状

态, 向着标准化检测与诊断迈出了坚实的第一步。

红外热像仪可广泛应用于夜间目标观察、工业监控、故障诊断、非接触物体温度分布测量、医学诊断、军事等领域。其具体应用有: ①对电厂和变电站电气设备的带电检测: 闸刀、开关、触头等接触不良; ②对加热和保温设备的衬里材料损伤情况和保温效果进行监测; ③对高压绝缘子绝缘值下降的测量; ④对热力系统的保温、漏汽、阻塞等故障的测量; ⑤对发电机、汽轮机、整流子温度场的测量; ⑥对避雷器发热及电场分布规律的测量; ⑦对多层复合材料及蜂窝状结构的材料进行探伤; ⑧在航天、航空工业上的应用也是有前景的, 如在风洞试验中的温度分布及变化规律的测量; ⑨在机械制造工业上及医学诊断、军事等方面的应用也是很广泛的。

四、红外热像检测技术的特点

由于红外热成像系统探测被测物体自身发射的“热辐射”, 因而被测物的热像图就提供了有关其自身状态的重要信息, 它表明了物体表面的热状态。对于涉及热辐射的所有领域, 它是一种理想的无损检测工具。与 X 射线一样, 能以不同于普通视觉感受的方式提供信息, 即物体表面发射率和物体内部容热耗散的量度, 从而可以揭示物体中尚未被察觉的异常状态。它的主要特点有:

(1) 可绘出空间分辨率和温度分辨率都较好的设备温度场的两维图形。

(2) 可提供非接触、非干扰式的物体表面温度测量。

(3) 可提供相对快速的实时测量, 从而允许进行温度瞬时状态研究和大范围设备表面温度变化的相对快速观察。

(4) 具有全被动式、全天候的特点。

红外热像技术采用红外热像仪通过接受物体表面辐射出的红外线, 来测定物体表面的温度场。进而根据温度分布及温度变化情况来研究、分析、判断物体内部或外部的某些状态、变化趋势。使用热像仪进行检测和诊断的经典方法是采用比较分析法, 对生产中运行的设备定期巡回检测, 相互比较其热像图变化, 并在实践证明设备稳定、正常的基础上, 建立热像图的安全标准。定期对相应的设备进行检测, 将结果与标准热像图比较。根据差异变化的程度, 结合工艺设备结构、材料特性, 判断设备是否正常, 或设备发生故障的部位及可能原因。

第二节

红外热像检测技术在石化行业的应用

一、概述

现代石化工业是高度自动化的生产系统, 使用了大量的压力容器和管道, 生产中的许多设备, 不仅是流程作业, 长周期运行, 而且大都是在高温高压易腐蚀的环境下工作, 存在易燃易爆的危险性。因此, 对生产过程中设备的检测与监测十分重要, 目前采用的做法是严格地执行定期大修制度。同样, 有时因为存在故障没能及时检修, 导致事故发生, 造

成严重的后果。鉴于这种现状，目前正在加强各种在线监测手段，改革定期大修制度，逐步向预知性维修制度过渡，而红外无损检测技术是其中重要的一种在线监测手段。

国内大型石化企业在利用这种技术上，已取得了较好的结果。在石化设备的检测上，近二十年来红外技术应用十分广泛，大部分设备都进行过红外无损检测，效果十分明显。石油化工总公司于1986年同时引进6台TVS红外热像仪，分别在茂名石化公司、抚顺石化公司、长岭炼油厂、乌鲁木齐石化总厂、齐鲁石化公司、扬子石化公司等单位得到了较好的使用，在生产实际中产生了很大的经济效益。

四川化工总厂利用红外热像仪对大化肥装置热交换器进行设备诊断时，测得南封头冷却水温差不正常，推断热交换器列管泄漏。在对离心压缩机的高压缸密封油高位槽进行检测发现，密封油槽的液位超过标准定值，导致高压缸密封油的参比压力差为零，诊断出浮环密封故障。

南京炼油厂利用红外测温仪对铂重整装置冷壁反应器的外壁进行诊断，其诊断结果为：高温热敏区不到规定的温度就改变了颜色，漆的质量有问题，并非反应器内部衬里损坏。对合成氮装置二段转化炉管进行了检测，发现管道内部隔热混凝土有损坏，用喷淋水冷却局部管道过热点以维持生产，这种诊断为准确决策提供了依据。

兰州炼化总厂在确定催化裂化装置、铂重整和加氢装置检修方案时，依据红外在线监测结果，取得很大经济效益。检测结果未见装置表面温度异常，状态良好，无须大修，惟加氢装置101反应筒体与下盖头接缝处有一处 $1000\text{mm} \times 400\text{mm}$ 的高温带。据此确定检修重点，打开后发现内衬损坏面积为 $800\text{mm} \times 200\text{mm}$ ，龟甲网外漏。由此大大缩短了检修周期。

抚顺石化公司利用红外热像仪，对本公司、石家庄炼油厂和大连石油七厂催化裂化反应器、再生器及提升器做定期监测，积累了大量的经验和丰富的数据，为提高催化再生器及沉降器的“安、稳、长、满、优”运行，完善和扩充现有的红外检测手段，探索衬里缺陷的精确诊断和定量分析的方法，并促进催化装置的定期维修向预知维修过渡，实现延长催化开工工期，挖潜增效等目标作了大量的工作。另外，辽阳石化总公司、天津石化公司、茂名石化公司、长岭炼油厂、镇海炼油厂、扬子石化公司、大庆石化总厂、乌鲁木齐石化总厂、克拉玛依炼油厂、金山石化公司、上海炼油厂、武汉石化总厂、广州石化总厂、燕山石化等单位都在红外检测方面做了大量的工作。

以上是红外技术在石化设备上的应用现状。从总体上看，整个检测技术还处在定性的经验阶段，如检测方法及判据都凭经验给出，实现定量化、标准化、规范化检测已是当务之急。必须加强这方面的基础研究，建立与之相应的理论体系，实现定量计算；实现与计算机结合，发展专家系统；制定相应规范，实现规范化检测。

二、红外热像检测技术在衬里损伤评估中的应用

红外检测的温度下限就是对衬里热设备表面正常标准温度的分析，可以通过对带非金属衬里的热设备正常运行情况下表面温度的计算来实现。这种计算的主要思想是假定衬里材料无损伤，然后按传热学理论计算出热设备表面温度值，认为这个温度值就是红外检测时的基准值。当红外检测温度小于这个值可以认为衬里无损伤，一旦检测温度高于这个