

〈综述与评论〉

红外热波无损检测技术的研发现状与进展

郑凯¹, 江海军², 陈力³

(1. 江苏省特种设备安全监督检验研究院, 江苏 南京 210036; 2. 南京诺威尔光电系统有限公司, 江苏南京 210046;
3. 电子科技大学, 四川 成都 610054)

摘要: 红外热波成像是近年来发展较快的一种新型无损检测技术, 它是一门跨学科、跨应用领域的通用型实用技术, 其三大核心技术包括热激励、红外图像采集及红外图像处理。本文对热激励技术中的闪光灯、激光、卤素灯、红外灯、超声、电磁等几种主要热激励方法的特点及研发现状进行了介绍与对比, 分析了采集技术中的制冷与非制冷热像仪各自特点, 并对红外图像处理技术中的降噪、增强、序列热图处理及缺陷提取等四大研究方向进行了总结, 介绍了相应发展状况和进展。最后总结了该技术的发展趋势。

关键词: 红外无损检测; 热波成像; 热波激励; 红外图像采集技术; 红外图像处理

中图分类号: TB302.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2018)05-0401-11

Infrared Thermography NDT and Its Development

ZHENG Kai¹, JIANG Haijun², CHEN Li³

(1. *Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China;*
2. *Noveltek Ltd, Nanjing 210046, China;* 3. *University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

Abstract: Thermography is a new NDT testing technology that has developed rapidly in recent years. It is an interdisciplinary and broadly applicable technology crossing multiple fields. Three major components of this technology include the excitation source, IR image acquisition, and data processing. This paper presents a brief comparative analysis of the current research status for different excitation sources, including flashlights, lasers, IR lamps, ultrasound, and electromagnetism. It compares the characteristics of cooled and uncooled thermal imagers and also introduces the recent development of various IR image processing technologies for feature enhancement, noise reduction, sequence processing, and defect extraction. Finally, the trend of this technology is briefly summarized.

Key words: thermography, nondestructive testing, thermal excitation, IR image acquisition, IR image processing

0 引言

热波成像是一种主动式红外无损检测技术, 它利用热能的传播来对材料的热导特性的变化进行检测。经过多年的发展, 已成为一种灵活便捷的通用型无损检测技术, 被广泛应用于金属、非金属、复合材料中存在的脱粘、裂纹、锈蚀、疲劳、损伤等缺陷的检测^[1-3]。

与射线、超声、磁粉、渗透、及涡流等传统无损检测技术相比, 它具有快速、高效、大面积、直观及可远距离非接触检测等优点, 是一种新型数字化无损检测技术, 近年来在国际上得到快速的发展, 并不断地被人们所接受并推广使用^[4-5]。作为一门跨学科、跨应用领域的通用型实用技术, 红外热波无损检测是对传统无损检测技术的替代和补充, 通过相互结合, 可以提

收稿日期: 2018-01-25; 修订日期: 2018-05-07.

作者简介: 郑凯 (1967-), 博士, 研究员级高级工程师, 研究方向: 无损检测新技术应用。E-Mail: kai.zheng@163.com.

通讯作者: 陈力 (1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为精密光学检测技术及红外无损检测。E-mail: chen_li@uestc.edu.cn.

基金项目: 质检公益性行业科研专项项目 (201410028, 201510068); 江苏省重点研发计划 (2015 省 615); 江苏省社会发展项目 BE2015725; 2016 江苏省激光与光电产业发展专项 (2016 苏南 201)。

高缺陷检测与诊断的可靠性。

1 国内外研究现状

红外热波无损检测技术的概念虽然早在 50 年前就被提出^[6],但其快速的发展还是自 20 世纪 80 年代,这主要是得益于制冷红外焦平面探测器的商业化应用。20 世纪 90 年代美国无损检测协会组织编写的无损检测手册红外与热检测分册里,已有专门篇幅论述红外热波无损检测在许多领域的应用^[7]。红外热波无损检测技术的研究和应用对各行各业、特别是高端领域具有重要意义,如航天航空、国防军工、新材料特别是复合材料、清洁能源、轨道交通等。检测缺陷的类型包括孔隙、裂纹、分层、脱粘、锈蚀、厚度非均匀性等。目前美国、俄罗斯、法国、德国、加拿大、澳大利亚等国已把红外热波无损检测技术作为标准技术手段广泛应用于飞机复合材料构件内部缺陷及胶接质量的检测、蒙皮铆接质量检测^[8-10]。美国还将其用于航天飞机耐热保护层潮湿检测,Atlas 空间发射舱复合材料的粘脱检测,A3 火箭的无损检测^[11]。美国多家大公司(如:GE、GM、波音、福特、洛克希德、西屋等)及政府机构(如:NASA、FAA、空军、海军)等已经在广泛应用和推广该项无损检测技术^[12-14]。国内,经过十几年的发展,红外热波无损检测技术已经取得了长足的进步和丰硕的成果。主要从事研究的科研院所所有南京大学、首都师范大学、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学、北京理工大学、电子科技大学、西南交通大学、南京航空航天大学、火箭军工程大学、北京航空材料研究院等。在热激励技术、红外图像采集技术、红外图像处理技术等方面取得了一系列的科研成果^[15-19],为该技术在国内的发展打下了坚实的基础。

2 热波无损检测关键技术的发展现状

2.1 热激励技术

红外热波无损检测技术与被动红外热成像的本质区别在于采用主动控制的热激励方式,以在材料内部产生温度梯度,通过热能的传播来探测材料内部热学信息的变化。对于不同的检测试件、检测环境、检测条件,需要有针对性的设计不同的热激励源,目前主要采用的有闪光灯、激光、红外灯、超声、电磁激励、THz 波等热激励方法。

1) 闪光灯激励

闪光灯激励是目前应用最广泛的热激励方法,采用高能量脉冲光在试件表面产生一个短周期的脉冲加热,利用其向试件内部传播的过程进行检测。该技

术最为经典、理论与技术最为成熟,其优点在于短脉冲能够提供较高的深度分辨率,缺点是单次检测的总能量相对有限。图 1 为闪光灯激励红外热波无损检测技术原理图。国际上积极开展闪光灯红外无损检测研究,美国韦恩州立大学是最早研究该技术的单位之一,取得了很多实际有用的研究成果;之后该技术逐渐被美国多家大公司(GE、GM、波音、福特等)和政府机构(NASA、FAA 等)所采用,美国 TWI(Thermal Wave Imaging)是第一个将闪光灯红外无损检测技术商业化的公司^[20-23]。北京航空航天大学、北京航空材料研究院、首都师范大学、北京维泰凯信新技术有限公司等研究人员利用国外进口闪光灯激励热波无损检测设备开展过许多相关研究,在理论基础、数据处理、试验研究、应用研究等方面进行了富有成效地研究,取得许多成果^[24-27]。

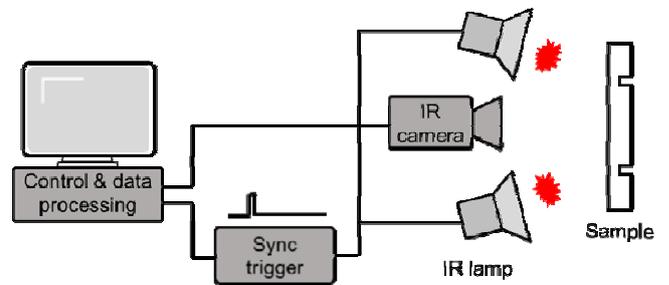


图 1 闪光灯激励红外热波无损检测技术原理

Fig.1 Principle of thermal wave NDE using flash excitation

在设备方面,国际上以美国 TWI 公司的闪光灯热波无损检测系统为代表,该设备配备制冷热像仪,利用大功率摄影闪光灯,最大能量为 9600J,最小脉冲宽度 2 ms。在国内,南京诺威尔光电系统有限公司自主开发了全电子控制闪光灯热波无损检测系统,可配置制冷/非制冷热像仪,闪光灯最大能量可达 18000J,脉冲宽度无级可调。并开发了便携式闪光灯设备,是目前国际上体积最轻、可电池供电的热波无损检测设备。

2) 激光激励

近年来,高功率激光器的发展十分迅速,特别是半导体激光器,其功率高、价格低,得到了广泛应用。然而虽然这些激光器的功率很高,但其在脉冲运行时的单脉冲能量很低,不适合直接作为热波成像技术所需的热激励源,因此激光适合于采用点光斑或者线光斑方式作为热激励源,图 2 为激光扫描激励红外热波无损检测技术原理。该技术的优点是可以快速扫描实现脉冲激励的效果,通过改变激光扫描速度可以改变热激励能量,还可实现锁相检测,同时由扫描所产生的三维温度场能被用来检测垂直表面的裂纹。英国巴斯大学,开展了以激光作为激励源的研究,主要

研究了缺陷尺寸定量测量^[28]。江海军^[29]等采用线光斑激光作为激励源,研究了其 2-D 理论模型,并推导出了数学解析解,并用该技术对涂层、不锈钢件、蜂窝等试件进行了检测,得到了良好的检测效果。蒋玉龙^[30]采用面光斑激光作为热激励源,采用锁相方式,实现了激光锁相红外热波无损检测技术对玻璃钢、复合材料、碳纤维蜂窝试件的检测。

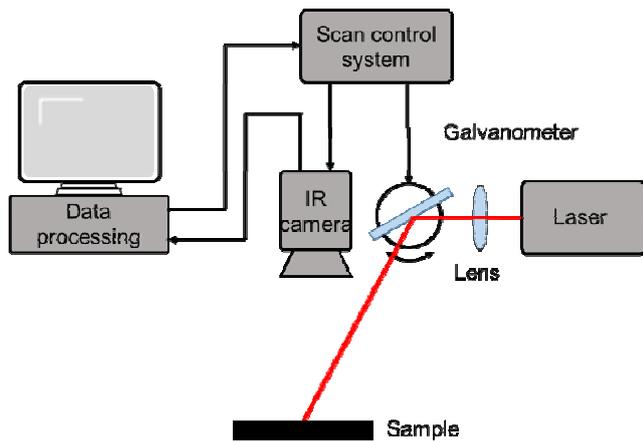


图2 激光扫描激励红外热波无损检测技术原理

Fig.2 Principle of laser scanning thermal wave NDE technique

3) 卤素灯/红外灯激励

该技术采用高功率卤素灯/红外灯激励由于灯管的启动时间长、热惯性大,功率密度不高,无法实现类似闪光灯一样的短脉冲热波,因此一般采用长周期脉冲热激励或者低频锁相方式,图3为卤素灯/红外灯激励红外热波无损检测技术原理示意图。该技术的优点在于激励源简单,功率可随意增大,激励时间可持续较长时间,适合大面积检测,但不适合高导热性材料或薄层试件的应用。国际上,德国斯图加特大学、法国 Cedip 公司、加拿大 Laval 大学等的研究人员都对锁相红外热波成像技术研究进行了深入研究,应用于航空器、飞机、玻璃纤维复合材料、直升机机身、汽车、集成电路、太阳能电池板等领域^[31-33]。国内,哈尔滨工业大学、大连理工大学、北京航空航天大学等对以卤素灯/红外灯激励源,实现锁相红外热波成像技术进行了理论、数据处理、试验与应用研究等方面进行了大量广泛的研究^[34-36],取得了一系列的研究成果。红外灯激励的热波无损检测设备技术上相对简单,目前国内外均有多家公司提供商业化产品。

4) 超声激励

超声激励红外成像技术是将高强度声波耦合到试件内部产生紊声场,在裂纹的两侧形成微弱相对位移并摩擦生热,产生红外信号。图4为该技术的原理示意图。超声波在物体内部的传播几乎不受几何形

状的限制与待测物体表面状态影响。该技术的优点是对闭合裂纹具有选择性加热的特点,即仅在裂纹两侧相接触的区域产生热量,因此具有很高的细微裂纹识别率,且能提高红外图像缺陷与无缺陷区域的对比度,从而提高检测能力,经数据处理后可以得到物体缺陷的准确位置及其它特征信息。该技术的缺点是因为大功率超声波必须通过刚性连接才能有效耦合,因此有对试件造成损伤的风险。超声激励是一种具有研究价值和潜力的热激励方法,适合于复杂结构件的裂纹检测,美国韦恩州立大学^[37]首先提出将超声波加热和红外热波技术相结合应用于无损检测中;英国思克莱德大学^[38]采用超声激励红外热波无损检测技术对航空发动机裂纹进行检测,在已知 60 个裂纹叶片,检测出了 52 个叶片的裂纹。国内以南京大学、哈尔滨工业大学、首都师范大学、装甲兵学院、火箭军工程大学、空军第一航空学院、中国空气动力研究发展中心等开展过大量研究,在加载方式、仿真、预紧力、加载位置、锁相算法、优化调制频率等方面取得了很好的成果^[39-43]。南京大学声学所对功率超声激励试件过程中非线性现象的产生机理进行了研究^[44-45]。

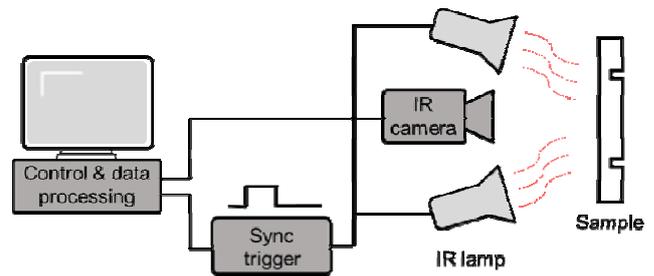


图3 卤素灯/红外灯激励红外热波无损检测技术原理

Fig.3 Principle of thermal wave NDE using IR lamps

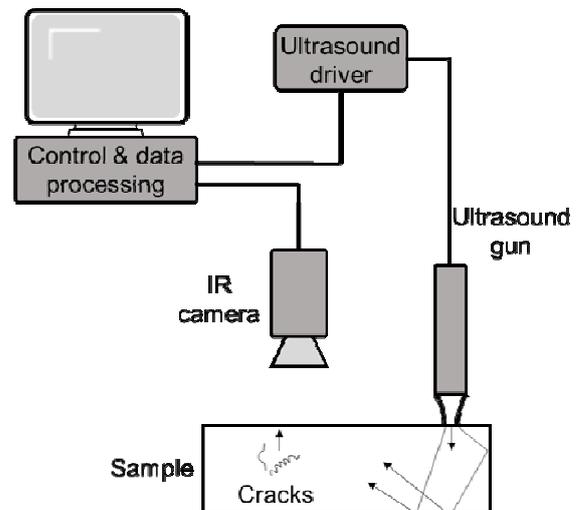


图4 超声激励红外热波无损检测技术原理

Fig.4 Principle of thermal wave NDE using ultrasonic excitation

5) 电磁激励

电磁激励红外热波成像无损检测技术基于电磁涡流感应原理,因此该技术又称为涡流热波成像无损检测技术。主要适用于导体材料,比如金属、复合材料等。它融合了涡流检测技术与热成像检测技术的优点。通常光激励的能量吸收只发生在物体表面,加热效率受表面吸收率的影响,而涡流加热技术通过电磁感应,与表面吸收率无关。涡流加热可直接加热导体内部(集肤深度以内范围),热波透入较深,因此检测深度更大,图5为电磁激励红外热波无损检测技术原理示意图。国际上,德国无损检测研究院对该技术进行了一系列理论研究,成功开发出固定式、便携式涡流红外热成像检测系统;奥地利莱奥本大学提出了铁磁性材料表面加热半解析模型;德国斯图加特大学、德累斯顿工业大学采用锁相方式,通过FFT变换得到温度信号的幅值和相位信息^[46-47]。国内南京大学、上海交通大学、南京航空航天大学、国防科技大学、电子科技大学、西南交通大学等研究人员对理论、仿真研究、金属腐蚀、碳纤维复合材料分层、检测信号参数提取、边缘区域裂纹等进行了深入研究,并已成功将其推广应用用于钢、铝、镍、钛等合金以及碳纤维复合材料的缺陷的检测,取得了可喜的成果^[48]。

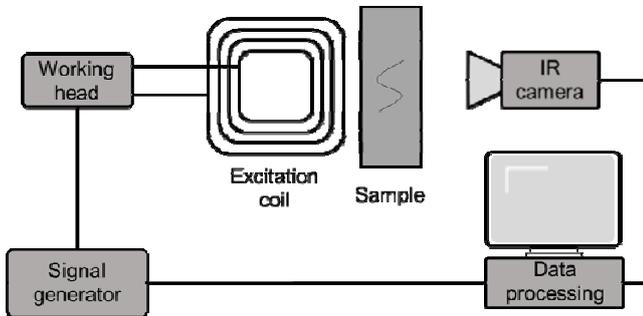


图5 电磁激励红外热波无损检测技术原理

Fig.5 Principle of thermal wave NDE using electromagnetic excitation

6) 其他激励方式

微波是波长介于1mm~1m之间的电磁波,已经在工业中作为加热源被广泛使用。微波对陶瓷、木制品、水具有良好的激励效果。但微波遇到金属界面会大量反射,因此不适合作为激励源对金属零件进行激励^[49]。太赫兹(Terahertz或THz,1THz=10¹²Hz)波通常是指频率在0.1~10Thz范围内的电磁波。利用THz波作为热源进行红外热波检测是一个新的探索。通常利用返波振荡器太赫兹源对试件表面进行持续的或者周期性的热激励。目前受太赫兹功率源的限制,这项技术尚处于试验室阶段^[50]。

2.2 红外图像采集技术

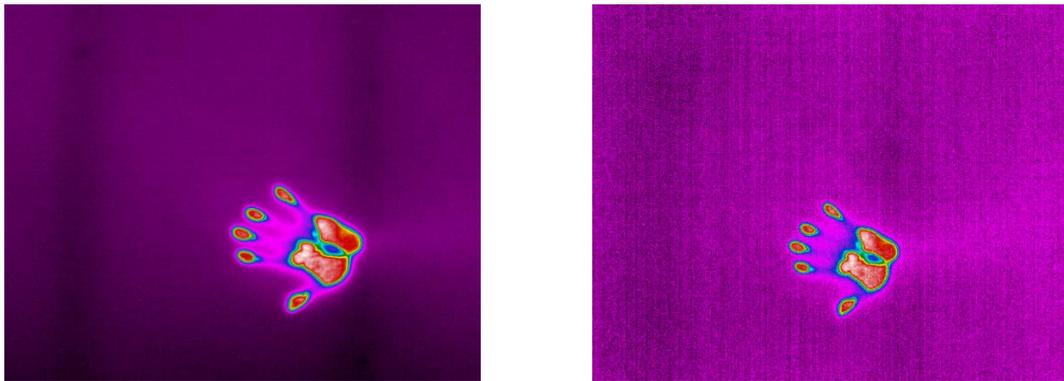
红外热波无损检测技术的核心设备之一是红外热像仪,用于接收被测目标的红外辐射能量并获得红外热像图,即将物体发出的不可见红外能量转变为可见的热图像,它的性能直接影响对缺陷的准确检测。红外热像仪主要参数有像素值、噪声等效温差(NETD)、空间分辨率、测温范围、视场角等。

1) 非制冷热像仪

非制冷红外热像仪采用的焦平面探测器(FPA)无需低温制冷。常见的探测器基于热释电原理,这是一种由较大温度系数的氧化钒(VO_x)或多晶硅(α-Si)材质的电阻所构成的阵列,具有表面积较大、热容量低,以及热绝缘的特点。虽然在灵敏度与噪声等方面与制冷型器件还有很大差距,但也具有一些突出的优点:它不需制冷,以至于成本低、功耗小、重量轻、小型化、启动快、使用方便、灵活等。目前,国际上美国、法国、英国、德国、日本的非制冷红外探测器研制生产水平居世界领先水平。非制冷红外焦平面阵列已由小规模160×120阵列发展到中、大规模的320×240和640×480乃至1024×768阵列,像素尺寸也由50μm减小到14μm,NETD<50mK。从长远来看,非制冷红外热成像技术更具优势,因此成为各国发展的重点。国内采用的进口非制冷探测器一般选用美国Flir公司的VO_x探测器和法国ULIS公司的α-Si探测器,前者具有较好的温度灵敏度,更受到市场的欢迎。国内现也有多家单位能够生产非制冷焦平面探测器,如高德红外、浙江大立、烟台艾睿、北京广微等,产品质量在不断地提高,性能接近国际水平。非制冷热像仪的国外厂商很多,主要有美国Flir、RNO、法国ULIS、英国BAE、德国InfraTec、日本NEC等,国内主要有高德红外、浙江大立、广州飒特、上海巨哥、烟台艾睿、北京广微等公司。

2) 制冷热像仪

目前制冷热像仪的性能仍然要比非制冷热像仪好,具有更多优势,探测灵敏度要更高。目前大多数高端应用的红外热像仪系统多是采用制冷型的。当然这类热像仪的价格更昂贵。目前的制冷热像仪都采用带有集成斯特林制冷机的焦平面传感器,该制冷机可将传感器温度降低至约100K,可将热噪声大幅降低。目前常用的制冷热像仪分辨率为640×512,NETD<20mK。国外厂商主要有美国FLIR、德国InfraTec、日本NEC等公司,国内主要有高德红外、昆明物理研究所等。作为比较,图6所示为墙上手印的红外图像,分别采用Flir制冷和非制冷热像仪进行观察的效果。



(a)制冷热像仪 (a) Cooled IR camera

(b)非制冷热像仪 (b) Uncooled camera

图6 墙上手印的红外图像 Fig.6 IR images of a handprint on drywall by cooled and uncooled cameras

2.3 红外图像处理技术

红外图像是灰度图像, 本身没有色彩, 通常的红外探测器的空间分辨率远低于可见光阵列传感器, 故对人眼而言, 红外图像与可见光图像相比分辨能力差。由于景物多数处于热平衡、常温下的红外辐射波长长、及大气衰减等原因, 造成红外图像对比度低、视觉效果模糊。另外由于外界环境的随机干扰和热成像系统的不完善, 给红外图像带来诸多噪声, 比如热噪声、散粒噪声、及电子噪声等, 使得红外图像的信噪比低, 对微小缺陷的识别形成干扰。因此, 对原始热图进行处理显得尤为重要, 红外图像处理的目的是滤除图像中背景干扰和噪声信号、增强缺陷信息和提高缺陷识别度, 以便从热图中提取更加准确丰富的特征。根据热图应用目的, 目前红外热波无损检测技术中的图像处理研究方向主要有4个。

1) 红外图像降噪技术

红外热像仪主要有以下几种噪声: 热噪声、散粒噪声、 $1/f$ 噪声、产生-复合噪声、固定图案噪声等。这些噪声源的综合作用使得红外图像对比度差、成像模糊、边缘不清、噪声大, 因此对噪声的有效处理显得非常重要。传统红外图像去噪方法主要采用线性滤波的方法, 主要有空域和频域两种方法, 空域常常是参考图像本身, 直接对图像像素进行处理, 包括均值滤波、中值滤波、高斯滤波等。频域滤波一般都将信号变换到频域, 再同所设计的窗函数相乘, 然后反变换到时域; 窗函数是根据所需滤除的频率分量所决定。频域方法主要有高通滤波、低通滤波、同态滤波等。在低信噪比的情况下, 经过滤波器处理的红外图像的信噪比得到的改善不大, 而且图像的细节信息也会被模糊掉了。小波变换具有频局部化分析的能力, 使其在图像降噪领域中得到了广泛的应用, 可以有效滤除噪声, 保留图像高频信息, 得到对原信号的最佳

重构, 被誉为“数学显微镜”。1992年, Matlab建立了小波变换的快速算法, 国内相继有电子科技大学、湖南大学、河北大学、武汉科技大学等科研人员对小波变换在红外图像降噪进行了深入研究, 取得了大量实用的研究成果^[51-54]。

2) 红外图像增强技术

红外热像仪常采用 14bits/16bits 的 AD 对探测器输出信号进行采样和量化。而常规的显示设备只有 8bits 数据宽度, 所以须对大动态范围的图像数据进行压缩处理。在实际处理操作中, 如果方法不当, 如只采用简单线性映射(如 AGC 方式)或非线性映射(如直方图均衡)对大动态范围的图像进行压缩变换, 会使得原本探测到的某些微弱信息丢失, 在 8 bits 图像中得不到显示。若所丢失的为关键细节, 则会直接影响到后续的目标识别效果。近年来, 研究人员对红外图像的增强进行了探索, 主要有三类算法: 基于统计直方图的增强、基于频率变化进行增强、及数字细节增强。前两类都容易造成许多细节信息永久性丢失。数字细节增强技术(Digital Detail Enhancement-DDE)是一种高级非线性图像处理算法, 可以在完成大动态数字图像压缩的同时, 尽可能保持并增强图像的细节。南京理工大学、电子科技大学、国防科技大学、北京理工大学、武汉光电国家实验室等的研究人员对数字细节增强技术都有较为深入的研究^[55-57], 并提出了各自核心算法, 普遍都是将高动态红外图像通过滤波器分成背景图像和细节图像, 再分别对背景图像压缩、细节图像增强, 最后背景图像和细节图像进行融合, 并压缩成 8 bits 图像。该方法在压缩红外图像数据宽度的同时保留了细节信息, 取得了良好的增强效果。

3) 红外序列热图处理技术

受红外热像仪噪声、激励源加热不均匀性、材料

表面吸收率不同的影响,导致单帧红外图像中缺陷信息可靠性较低,部分细微缺陷信息甚至会被噪声淹没的情况。因此对红外序列图像处理显得尤为重要,这是红外热波无损检测领域的一项关键技术,主要用于消除不利因素的干扰、提高信噪比、增强缺陷可显示性。红外热波序列图像处理技术主要有以下几类方法。

热信号重建理论 TSR (Thermal Signal Reconstruction)

TSR 针对脉冲激励形式的红外序列图像处理,可有效消除激励源本身非均匀性及材料表面吸收不均匀性的影响,增强缺陷显示。具体的方法是对降温阶段序列图像取双对数,再采用多项式进行数据拟合,然后对图像序列进行重建,进而对时间变化求导得到一阶图像、二阶图像,在降低噪声与增强图像的同时减少材料表面吸收非均匀性的影响。TSR 最早由美国 TWI 公司提出,并且已经实用化。国内首都师范大学、北京航空航天大学研究人员对 TSR 进行了深入研究^[58-59],申请了相关专利,并在此基础上深入研究了材料蓄热系数测量方法。

锁相法 LT (Lock-in Thermography)

锁相红外热波无损检测技术采用周期性调制热激励源,利用周期信号的时间相关性来提高热波图像的信噪比。锁相法所使用的热激励源包括卤素灯/红外灯、激光、超声、电磁等。图像处理方式主要包括傅里叶变换法、相关函数法、四点法等,最后得到热波振幅和相位图像,其中相位图像具有与激励源非均匀性及样品表面吸收及发射率无关的优点,被广泛采用。由于锁相技术采用周期性热激励,所以可以通过增加采集周期来提高热波图像的信噪比,达到很高的检测灵敏度。特别适合于:①分层缺陷、微小缺陷、裂纹的检测;②疲劳损伤的检测。其缺点是如果采用单一频率,检测灵敏度将对特定深度敏感,而其它深度的检测灵敏度会下降。因此如果需要对较大深度范围进行检测,需要采取多个调制频率。国际上,加拿大多伦多大学 Mandelis 教授首先提出红外热波雷达成像检测技术,采用线性调频 Chirp 信号规律变化,解决了单次实验只能采用固定频率检测固定深度的局限^[60]。国内首都师范大学、哈尔滨工业大学、南京航空航天大学等研究人员对理论建模、锁相频率、锁相参数选择、锁相数据处理、缺陷量化都有研究^[61]。国外锁相热波无损检测装备供应商主要有美国的 Flir、德国的 Automation Technology 及 Edevis。在国内南京诺威尔光电系统有限公司为主要的商业化设备供应商,具有多种热激励方式。

脉冲相位法 PPT (Pulse phase Infrared Thermography)

它结合了脉冲红外热波技术与锁相红外热波技术的特点,克服了脉冲红外热波技术对加热均匀性的要求以及锁相红外热波技术检测时间较长的局限。所使用的可为闪光灯或激光等短脉冲热激励源。脉冲相位法对序列图像进行傅里叶变换,得到不同频率的振幅与相位图像,反映不同深度的热学信息。该方法于1996年首先由加拿大拉瓦尔大学 X.Maldague 教授提出^[62]。国内的北京航空航天大学、北京航空材料研究院、首都师范大学等对脉冲相位法理论模型、傅里叶变换 FFT 处理、相位序列热图“盲频”等都有较深入研究^[63-64],为该技术进一步发展提供了理论基础。

主成分分析法 PCA (Principal Component Analysis)

采用矩阵奇异值分解方法,对图像序列进行数据分解,得到分别表示信号空间变化的正交本征函数和时间变化的主成分分量,将多元数据的特征在降低维空间里直观地表示出来。1901年, Pearson 首先提出, Hotelling 于1933年对此方法进行改进,成为目前各种主成分分析法的基础^[65]。国内电子科技大学、西南交通大学等研究人员运用该技术对碳纤维、蜂窝、发动机叶片等试件进行增强处理,取得了满意的结果^[66]。主成分分析主要针对电磁激励、超声激励红外序列图像进行处理,具有降低噪声、增强缺陷显示等优点。

4) 红外图像缺陷提取

对红外热图噪声降噪、红外图像增强后,需要对红外热图中缺陷区域进行提取,这是对红外热图处理主要目的,也是定量分析必经的过程。传统边缘检测算子效果都不太明显,南京大学、电子科技大学、北京航空航天大学、火箭军工程大学的研究人员分别在区域生长法、小波变换法、BP 神经网络法方面有深入研究,通过算法对缺陷进行提取,取得较满意的效果。

3 红外热波无损检测的应用

红外热波无损检测技术因其独特的技术优势已经在很多行业里得到实际的应用,特别是航天航空方面,已经成为一种新型的常用检测手段,特别是针对各种复合材料,如碳纤维板材与蜂窝结构材料等,已经在工业界形成多种检测标准,这些都已经为大家所熟知。

红外热波无损检测技术在其它多个应用领域也进行了很多开拓性的工作,并取得一些令人鼓舞的结果,尽管这些研究在技术上可能尚欠成熟,或还没有

形成商业化应用,但展现了很好的前景。例如在文物与艺术品保护方面,通过红外热波成像技术对油画、古建筑表面漆层、雕塑品等进行检测,可以研究艺术品的老化、内部构造、材料特征等^[67-74]。对于工业界各种微细裂纹的检测,多种电磁激励与超声激励红外热波成像技术得到研究开发,这些技术特别适合检测近表面的疲劳裂纹,具有很好工业应用前景^[75-81]。红外热波成像技术也被用于检测焊接质量,如金属板材的点焊结合状态^[82-83]。对半导体芯片封装质量的检测也取得良好的结果^[84],可在非接触的条件下快速有效地发现3D芯片封装的脱粘缺陷。而对太阳能电池片的研究也能有效地发现缺陷的位置与特性,并以直观的图像呈现^[85-86]。红外热波成像技术还被用于材料热学性质及相应物理参数的测量,可快速对大面积材料及薄膜的热学参数进行成像检测^[87-90]。在对大型物体的检测方面红外热波成像技术也具有很大的应用空间,如混凝土建筑结构的桥梁等。在这种情况下热激励的能量需要很高,因此可以利用太阳光的能量,实现对桥梁的损伤及内部钢筋的锈蚀进行检测^[91-93]。另一种大型亟需检测的物体是风电叶片,目前很多已经服役到缺陷容易发生的年限,目前尚缺有效的在役检测手段。采用红外热波成像技术除了人为的热激励方式外,也可以利用自然环境的温度变化进行检测,并取得了较好的结果^[94-96]。在远距离检测方面,红外热波技术也被用于探测微量危险品如爆炸物等,开拓了反恐防暴应用的可能性^[97]。在农业方面,热波成像技术也有较好的应用前景,如可以用于检测水果的损伤状况,通常这些缺陷无法从表面看出来^[98-100]。

4 结束语

20世纪80年代起,电子技术、热成像器件和计算机的飞速发展有效地推动了红外热波无损检测技术的进步。进入21世纪,红外热波无损检测技术在航空、航天、机械、建筑、冶金、电力、汽车、核能、铁路等行业中得到广泛的应用。该技术近年来在国内发展迅速,目前已形成多项国家标准,由中国特检院沈功田所主持的热波无损检测系列国际标准已逐步获得国际标准化组织(ISO)的批准。相关技术正从实验室逐步走向工程应用阶段,为各行各业的产品故障诊断、缺陷检测起到了关键的作用。总结该技术的发展趋势有如下几点:

1) 缺陷人工识别向自动识别发展

目前缺陷的判断主要还是依靠人眼进行判断和观察,伴随着神经网络和人工智能深度学习的发展,缺陷人工识别有望向智能自动化发展。

2) 工程化应用

红外热波无损检测技术已经逐步由实验室进入工业领域,未来对自动化检测的需求会越来越高,更具个性化的定制设备需求越来越多。

3) 多种检测技术融合

五大常规检测方法和新型无损检测技术都有其对应的优点和不足,为更好解决实际检测问题,常常需要采用优势互补多种检测方法相结合的方式,从而为用户提供优质、高效、安全、全方位的无损检测解决方案。

参考文献:

- [1] 孙全胜,李涛. 红外检测技术在探伤中的应用[J]. 红外技术, 2003, 25(2): 65-69.
SUN Quansheng, LI Tao. Infrared Technique Applied in Nondestructive Testing[J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(2): 65-69.
- [2] 张晓燕,金万平. 红外热波检测技术在美军装备维修中的应用[J]. 航空维修与工程, 2006, 10(5): 41-43.
ZHANG Xiaoyan, JIN WanPing. The Application of Thermal Wave Detection in American EquipMaintenance[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2006, 10(5): 41-43.
- [3] 梅林,张广明,王裕文. 红外热成像无损检测技术及其应用现状[J]. 无损检测, 1999, 19(11): 466-468.
MEI Lin, ZHANG Guangming, WANG Yuwen. Infrared Imaging Nondestructive Testing Technology and Its Current Applications[J]. *Nondestructive Testing*, 1999, 19(11): 466-468.
- [4] 李国华,吴立新,吴森,等. 红外热像技术及其应用的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(3): 227-230.
LI Guohua, WU Lixin, WU Miao, et al. Current Status and Applications of Infrared Thermography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 227-230.
- [5] 袁仁续,赵鸣. 红外热像技术在无损检测中的应用研究进展[J]. 福州大学学报, 2005, 33(7): 203-207.
YUAN Renxu, ZHAO Ming. Application of infrared thermal image technology in Non-destructive Examination[J]. *Journal of Fuzhou University*, 2005, 33(7): 203-207.
- [6] 戴景民,汪子君. 红外热成像无损检测技术及其应用现状[J]. 自动化技术与应用, 2007, 26(1): 1-7.
DAI Jingmin, WANG Zijun. Infrared Thermography Nondestructive Testing Technology and Its Applications[J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2007, 26(1): 1-7.
- [7] 王迅,金万平,张存林,等. 红外热波无损检测技术及其进展[J]. 无损检测, 2004, 26(10): 497-499.
WANG Xun, JIN Wanping, ZHANG Cunlin, et al. Actuality & Evolvement of Infrared Thermal Wave Nondestructive Imaging Technology[J]. *Nondestructive Testing*, 2004, 26(10): 497-499.

- [8] Maldague X. Introduction to NDT by active Infrared thermography[J]. *Material Evaluation*, 2002, **60**(9): 1060-1073.
- [9] Carlomagno G M, Meola C. Comparison between thermographic techniques for frescoes NDT[J]. *NDT & E International*, 2002, **35**(8): 559-565.
- [10] WANG X. Pulse-echo thermal wave imaging of metals and composite[D]. Detroit: Wayne State Univeristy, 2001.
- [11] X Maldague, F Galmiche, A Ziadi. Advances in pulsed phase thermography[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, **43**(4): 175-181.
- [12] D Palmond, W Peng. Thermal imaging of composites[J]. *Journal of microscopy*, 2001, **201**(2): 163-170.
- [13] Nidal F Shilbayeh, Mahmoud Z Iskandarani. Application of new feature extraction technique to PVT images of composite structures[J]. *Information Technology*, 2004, **3**(3): 332-336.
- [14] Vallerand S, Maldague X. Defect Characterization in pulsed thermography: a statistical method compared with Kohonen and perceptron neural networks[J]. *NDT & E International*, 2000, **33**(5): 307-315.
- [15] 刘颖韬, 郭广平, 杨党纲, 等. 脉冲热像法在航空复合材料构件无损检测中的应用[J]. *航空材料学报*, 2012, **32**(1): 72-77.
LIU Yingtao, GUO Guangping, YANG Danggang, et al. Pulsed Thermography of Composite Components Used in Aerospace Applications[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2012, **32**(1): 72-77.
- [16] 何嘉武, 张超省, 冯辅周, 等. 红外热波无损检测技术的研究现状及应用[J]. *振动与冲击*, 2010, **29**(7): 293-296.
HE Jiawu, ZHANG Chaosheng, FENG Fuzhou, et al. Research & Application of Infrared Thermal Wave Nondestructive Detection Technology[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, **29**(7): 293-296.
- [17] 彭建平. 涡流脉冲热成像检测铁轨滚动接触疲劳的方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
PENG Jianping. Research on Eddy Current Pulsed Thermography Detection Rolling Contact Fatigue Crack in Railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [18] Milne J M, Reynolds W N. The nondestructive evaluation of composite and other materials by thermal pulse video thermography[J]. *SPIE*, 1984, **520**(6): 119-122.
- [19] 李国华, 吴立新, 吴淼, 等. 红外热像技术及其应用的研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(3): 227-230.
LI Guohua, WU Lixin, WU Miao, et al. Current Status and Applications of Infrared Thermography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(3): 227-230.
- [20] Favro L D, Kuo P K, Thomas R L. Thermal wave imaging for aging aircraft inspection[J]. *Material Evaluation*, 1993, **53**(12): 1386-1389.
- [21] Almond D P, Peng W. Thermal imaging of composites[J]. *Journal of Microscopy*, 2001, **201**(2): 163-170.
- [22] Favro L D, Ahmed T, Han X Y, et al. Thermal Wave Imaging of Disbonding and Corrosion on Aircraft[J]. *Review Progress of Quantitative NDT Evaluation*, 1995, **15**(10): 1747-1753.
- [23] HAN X Y, Favro L D, Thomas R L. Thermal wave NDI of Disbonds and corrosion in aircraft[C]//*Second Joint NASA/FAA/DOD Conference on Aging Aircraft*, 1999: 265-274.
- [24] 郭兴旺, 许文浩. 蜂窝结构积水的脉冲红外热像无损检测的传热分析[J]. *红外技术*, 2011, **33**(5): 275-280.
GUO Xingwang, XU Wenhao. Heat Transfer Analysis of Pulsed Thermography for Water Detection in Honeycomb Structures[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(5): 275-280.
- [25] 刘颖韬, 牟仁德, 郭广平, 等. 热障涂层闪光灯激励红外热像检测[J]. *航空材料学报*, 2015, **35**(6): 83-90.
LIU Yingtao, MU Rende, GUO Guangping, et al. Infrared Flash Thermographic Nondestructive Testing of Defects in Thermal Barrier Coating[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2015, **35**(6): 83-90.
- [26] 王迅, 金万平, 张存林, 等. 红外热波无损检测技术及其进展[J]. *无损检测*, 2004, **26**(10): 497-501.
WANG Xun, JIN Wanping, ZHANG Cunlin, et al. Actuality & Evolvement of Infrared Thermal Wave Nondestructive Imaging Technology[J]. *Nondestructive Testing*, 2004, **26**(10): 497-499.
- [27] 张小川, 金万平, 李艳红, 等. 玻璃钢平底洞缺陷试件红外热波检测方法[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(1): 16-18.
ZHANG Xiaochuan, JIN Wanping, LI Yanhong, et al. Measurement of Thickness of Glass Fiber Reinforced Plastic Flat Bottom Hole Sample by Infrared Thermal NDT[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(1): 16-18.
- [28] 刘颖韬, 郭广平, 曾智, 等. 红外热像无损检测技术的发展历程、现状和趋势[J]. *无损检测*, 2017, **39**(8): 63-70.
LIU Yingtao, GUO Guangping, ZENG Zhi, et al. The Development History, Status and Trends of Infrared Thermographic Nondestructive Testing[J]. *Nondestructive Testing*, 2017, **39**(8): 63-70.
- [29] 江海军, 陈力, 张淑仪. 激光扫描红外热波成像技术在无损检测中的应用[J]. *无损检测*, 2014, **36**(12): 20-22.
JIANG Haijun, CHEN Li, ZHANG Shuyi. Application of the Laser Scanning Infrared Thermography for Nondestructive Testing[J]. *Nondestructive Testing*, 2014, **36**(12): 20-22.
- [30] 蒋玉龙. 激光锁相红外无损检测技术研究及系统研制[D]. 北京: 首都师范大学, 2014.
JIANG Yulong. Phase-locked Laser Infrared Non-destructive Testing Technology Research and System Development[D]. Beijing: Capital Normal University, 2014.
- [31] WU D T, BUSSE G. Lock-in thermography for NDT evaluation of materials[J]. *Gen. Therm*, 1998, **37**(11): 369-703.
- [32] WONG B S, TUI C G, BAI W, et al. Thermographic evaluation of defects in composite materials[J]. *Insight*, 1999, **41**(8): 504-510.

- [33] D Wu, T Zwerschper, A Salerno, et al. Lock-in Thermography for NDT Evaluation of Aerospace Structures[J]. *NDT. net*, 1998, **3**(9): 18-21.
- [34] 刘俊岩, 戴景民, 王扬. 红外图像序列处理的锁相热成像理论与试验[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(2): 346-351.
LIU Junyan, DAI Jingmin, WANG Yang. Theory and experiment of IR lock-in thermography with image sequence processing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(2): 346-351.
- [35] 赵廷广. 基于锁相红外热像理论的无损检测及疲劳性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
ZHAO Tingguang. Nondestructive Testing and Fatigue Analysis Based on Lock-in Infrared Thermography[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [36] 周正干, 贺鹏飞, 赵翰学, 等. 钛合金蜂窝结构蒙皮脱焊缺陷锁相红外热成像检测[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, **42**(9): 1795-1801.
ZHOU Zhenggan, HE Pengfei, ZHAO Hanxue, et al. Detection of skin desoldering defect in Ti-alloy honeycomb structure using lock-in infrared thermography test[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, **42**(9): 1795-1801.
- [37] Favro LD, Han X, Ouyang Z, et al. Infrared imaging of defects heated by sonic pulse[J]. *Rev. Sci. Instrum*, 2000, **71**(6): 2418-21.
- [38] Bolu G, Gachagan A, Pierce G, et al. Reliable thermosonic inspection of aero engine turbine blades[J]. *Insight*, 2010, **52**(9): 488-493.
- [39] CHEN Zhaojiang, ZHENG Jiang, ZHANG Shuyi, et al. Finite element modeling of heating phenomena of cracks excited by high-intensity ultrasonic pulses[J]. *CHINESE PHYSICS B*, 2010, **19**(11): 678-690.
- [40] 刘慧. 超声红外锁相热像无损检测技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
LIU Hui. Research on Ultrasound Infrared Lock-in Thermography for Nondestructive Testing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [41] 陈大鹏. 超声脉冲及超声脉冲相位热像技术用于无损检测的实验研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
CHEN Dapeng. Experimental Studies on the Applications of Ultrasonic Pulse Thermography and Ultrasonic Burst Phase Thermography in NDT[D]. Beijing: Capital Normal University, 2009.
- [42] 冯辅周, 张超省, 袁建, 等. 超声红外热像技术中裂纹的识别和重构[J]. *无损检测*, 2011, **33**(11): 17-20.
FENG Fuzhou, ZHANG Chaosheng, YUAN Jian, et al. Identification and Reconstruction of Cracks in Ultrasonic IR Imaging[J]. *Nondestructive Testing*, 2011, **33**(11): 17-20.
- [43] 张炜, 罗文源, 王冬冬, 等. 基于超声热波技术的复合材料冲击损伤检测研究[J]. *固体火箭技术*, 2013, **36**(6): 836-841.
ZHANG Wei, LUO Wenyuan, WANG Dongdong, et al. Impact damage detection of composites based on ultrasonic thermography technique[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2013, **36**(6): 836-841.
- [44] ZHENG Kai, ZHANG Shuyi, CHEN Zhaojiang. Anomalous subharmonics excited by intensive ultrasonic pulses with a single frequency[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(22): 3188.
- [45] CHEN Zhaojiang, ZHANG Shuyi, ZHENG Kai, et al. Quasisubharmonic vibrations in metal plates excited by high-power ultrasonic pulses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **106**(2): 1147.
- [46] W Bai, B S Wong. Photothermal Models for Lock-in Thermographic Evaluation of Plates with Finite Thickness under Convection Conditions[J]. *Appl. Phys*, 2001, **89**(6): 3275-3282.
- [47] D S Forsyth, M Genest, J Shaver, et al. Evaluation of Nondestructive Testing Methods for the Detection of Fretting Damage[J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, **29**(10): 810-821.
- [48] 周德强, 田贵云, 王海涛, 等. 脉冲涡流无损检测技术的研究进展[J]. *无损检测*, 2011, **33**(10): 25-30.
ZHOU Deqiang, TIAN Guiyun, WANG Haitao, et al. The Recent Developments of Pulsed Eddy Current Nondestructive Testing Technology[J]. *Nondestructive Testing*, 2011, **33**(10): 25-30.
- [49] 郭伟, 董丽虹, 徐滨士, 等. 主动红外热像无损检测技术的研究现状与进展[J]. *无损检测*, 2016, **38**(4): 58-62.
GUO Wei, DONG Lihong, XU Binshi, et al. Research Status and Progress of Active Infrared Thermographic Nondestructive Testing[J]. *Nondestructive Testing*, 2016, **38**(4): 58-62.
- [50] 陈大鹏, 邢春飞, 张峥, 等. 太赫兹激励的红外热波检测技术[J]. *物理学报*, 2012, **61**(2): 1-6.
CHEN Dapeng, XING Chunfei, ZHANG Zheng, et al. Terahertz thermal wave nondestructive test[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(2): 1-6.
- [51] 罗万团, 陈福深. 改进的小波去噪法的研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(1): 226-228.
LUO Wanguo, CHEN Fushen. Improved wavelet-denoising method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(1): 226-228.
- [52] 于国桥, 刘天华. 基于小波变换的红外图像去噪[J]. *红外*, 2007, **28**(2): 25-27.
YU Guoqiao, LIU Tianhua. Infrared Image Denoising Based on Wavelet Transform[J]. *Infrared*, 2007, **28**(2): 25-27.
- [53] 张瑾, 陈向东. 一种基于小波变换的红外图像去噪方法[J]. *传感器与微系统*, 2006, **25**(8): 7-9.
ZHANG Jin, CHEN Xiangdong. Method of infrared image de-noising via wavelet transform[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2006, **25**(8): 7-9.
- [54] 杨恢先, 王绪四, 谢鹏鹤, 等. 改进阈值与尺度间相关的小波红外图像去噪[J]. *自动化学报*, 2011, **37**(10): 1167-1173.
YANG Huixian, WANG Xusi, XIE Penghe et al. Infrared Image Denoising Based on Improved Threshold and Inter-scale Correlations of Wavelet Transform[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(10): 1167-1173.

- [55] 陈小波, 鲁新平, 刘志波. 一种基于图像分层处理的 DDE 算法[J]. 微处理机, 2013, 2(2): 49-56.
CHEN Xiaobo, LU Xiping, LIU Zhibo. A DDE Algorithm Based on Hierarchical Data Processing of Image[J]. *Microprocessors*, 2013, 2(2): 49-56.
- [56] 刘婷婷. 红外图像细节增强算法与实现的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
LIU Tingting. Research on Detail Enhancement Algorithm and Implementation for Infrared Images[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [57] 董静. 基于 DDE 技术分析的红外图像细节增强算法[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(5): 51-53.
DONG Jing. Digital Image Detail Enhancement Algorithm Based on DDE Technology[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, 10(5): 51-53.
- [58] 李艳红. 被检物表面条件对红外热波无损检测结果影响的研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2006.
LI Yanhong. The Study of Sample's Surface Condition Influence to the Results of Infrared Thermal Wave Nondestructive Evaluation Technique[D]. Beijing: Capital Normal University, 2006.
- [59] 其达拉图, 郭兴旺. 基于多项式拟合的脉冲红外热像无损检测数据处理方法[J]. 机械工程师, 2009, 2(2): 41-43.
Qidalatu, GUO Xingwang. Data Processing Technique Based on Polynomial Fitting in Pulsed Thermography[J]. *Mechanical Engineer*, 2009, 2(2): 41-43.
- [60] Mandelis A. Frequency modulated (FM) time delay photoacoustic and photothermal wave spectroscopies. Technique, Instrumentation, and detection. Part I: Theoretical[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1986, 57(4): 617-621.
- [61] 刘俊岩, 刘勋, 王扬. 线性调频激励的红外热波成像检测技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1416-1422.
LIU Junyan, LIU Xun, WANG Yang. Technology of linear frequency modulation infrared thermal-wave imaging for nondestructive testing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1416-1422.
- [62] X Maldague, Marinetti S. Pulsed Phase Infrared Thermography[J]. *Appl. Phys.*, 1996, 79(5): 2694-2698.
- [63] 郭兴旺, 刘颖韬, 郭广平, 等. 脉冲相位法及其在复合材料无损检测中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(10): 1049-1053.
GUO Xingwang, LIU Yingtao, GUO Guangping, et al. Pulsed phase thermography and its application in the NDT of composite materials[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(10): 1049-1053.
- [64] 刘颖韬, 郭广平, 杨党纲. 脉冲相位法用于复合材料层析检测的研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(4): 390-392.
LIU Yingtao, GUO Guangping, YANG Danggang. Pulsed Phase Infrared Thermography and Its Application in Thermal Tomography of Composite Materials[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(4): 390-392.
- [65] 张焱. 利用主动式脉冲激励红外热成像技术进行缺陷深度计算的研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2010.
ZHANG Yan. Research on defect depth calculation using active pulse excited infrared thermal imaging technology[D]. Beijing: Capital Normal University, 2010.
- [66] 白利兵. 电涡流脉冲热成像无损检测技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
BAI Libing. Research on Eddy Current Pulsed Thermography Non-destructive Evaluation Technique[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010.
- [67] D Ambrosini, C Daffara, R Di Biase, et al. Integrated reflectography and thermography for wooden paintings diagnostics[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2010, 11(2): 196-204.
- [68] N Avdelidis, A Moropoulou. Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2004, 5(1): 119-127.
- [69] K Blessley, C Young, J Nunn, et al. The feasibility of flash thermography for the examination and conservation of works of art[J]. *Studies in Conservation*, 2010, 55(2): 107-120.
- [70] J L Bodnar, K Mouhoubi, G Szatanik-Perrier, et al. Photothermal thermography applied to the non-destructive testing of different types of works of art[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2012, 33: 1996-2000.
- [71] J C Candoré, J L Bodnar, V Detalle, et al. Non-destructive testing of works of art by stimulated infrared thermography[J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2012, 57(2): 21002.
- [72] D Gavrilov, R G Maev, D P Almond. A review of imaging methods in analysis of works of art: Thermographic imaging method in art analysis[J]. *Canadian Journal of Physics*, 2014, 92(4): 341-364.
- [73] F Mercuri, C Cicero, N Orazi, et al. Infrared Thermography Applied to the Study of Cultural Heritage[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2014: 1-6.
- [74] P Theodorakeas, N P Avdelidis, E Cheilakou, et al. Quantitative analysis of plastered mosaics by means of active infrared thermography[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 73: 417-425.
- [75] Bouteille P, Legros G. Induction thermography: an alternative to conventional NDT on forged components[C]//*COFREND congress proceedings*, 2014.
- [76] Rantala J, Wu D, Busse G. Amplitude-modulated lock-in vibrothermography for NDE of polymers and composites[J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 1996, 7(4):215-228.
- [77] Piau J P, Bendada A, Maldague X, et al. Nondestructive testing of open microscopic cracks in plasma-sprayed-coatings using ultrasound excited

- vibrothermography[J]. *Nondestructive Testing & Evaluation*, 2008, **23**(2): 109-120.
- [78] Chaki S, MaricalP, Panier S, et al. Interfacial defects detection in plasma-sprayed ceramic coating components using two stimulated infrared thermography techniques[J]. *NDTE Int*, 2011, **44**: 519-22.
- [79] Zweschper T, Riegert G, Dillenz A, et al. Frequency modulated elastic wave thermography[C]//*Proceedings of SPIE-the international society for optical engineering thermosense XXV*, 2003, **5073**: 386-391.
- [80] Mendioroz A, Castelo A, Celorrio R, et al. Characterization of vertical buried defects using lock-in vibrothermography[J]. *I. Direct problem. Meas. Sci. Tech.*, 2013, **24**: 065601-1-11.
- [81] A Mendioroz a, A Castelo a, R. Celorrio b, A.Salazar. Characterization and spatial resolution of cracks using lock-in vibrothermography[J]. *NDT & E International*, 2014, **66**: 8-15.
- [82] Chokkalingham S, Chandrasekhar N, Vasudevan M. Predicting depth of penetration and weld bead width from infra-red thermal image of weld pool using artificial neural network[J]. *J. of Intelligent Manufacturing*, 2012, **23**: 5.
- [83] Chandrasekhar N, Vasudevan M, Bhaduri AK, et al. Intelligent modeling for estimating weld bead width and depth of penetration from infra-red thermal images of the weld pool[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2013, **26**(1): 59-71.
- [84] CHEN Li, JIANG Haijun. Synchronous laser scanning IR imaging for chip bonding defect inspection[C]//*Proc. 17th International Conference on Electronic Packaging Technology*, 2016.
- [85] Straube H, Breitenstein O, Wagner J M. Lock-In Thermography on Crystalline Silicon on Glass (CSG) Thin Film Modules: Influence of Peltier Contributions[C]//*European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2009.
- [86] Breitenstein O, Rakotoniaina J P, Rifai M H A. Quantitative evaluation of shunts in solar cells by lock - in thermography[J]. *Progress in Photovoltaics Research & Applications*, 2010, **11**(8): 515-526.
- [87] Balderas-Lopez J A, Mandelis A. Self-normalized photothermal technique for accurate thermal diffusivity measurements in thin metal layers[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, **74**(12): 5219-5225.
- [88] ASTM-E-1461-07. Standard test method for thermal diffusivity of solids by the flash method[S]. Annual book of ASTM standards, 2007.
- [89] Balderas-López J A, Mandelis A. Self-normalization photothermal technique for accurate thermal diffusivity measurements in thin metal layers[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, **74**(12): 5219-25.
- [90] ASTM-E-1461-07. Standard test method for thermal diffusivity of solids by the flash method[S]. Annual book of ASTM standards, 2007.
- [91] ASTM D4788. Standard Test Method for Detecting Delamination in Bridge Decks Using Infrared Thermography[S].
- [92] H Cannard, M Mahrez, T Perrin, et al. The use of infrared thermography for defects detection on reinforced concrete bridges[C]//*Conference of Quantitative Infrared Thermography*, 2014.
- [93] K Kobayashi, N Banthia. Corrosion detection in reinforced concrete using induction heating and infrared thermography[J]. *J. of Civil Structural Health Monitoring*, 2011, **1**: 25-35.
- [94] Soonkyu Hwanga, Yun-Kyu Anb, Hoon Sohn. Continuous Line Laser Thermography for Damage Imaging of Rotating Wind Turbine Blades[J]. *Procedia Engineering*, 2017, **188**: 225-232.
- [95] J Yang, J Choi, S Hwang, et al. A reference-free micro defect visualization using pulse laser scanning thermography and image processing[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, **27**: 085601.
- [96] M Szwedo, P Hellstein. Qualitative diagnostics of wind-turbine blades inspection using activeThermography[C]//*Conference of Quantitative Infrared Thermography*, 2014.
- [97] Kendziora Christopher A, Furstenberg Robert, Papantonakis Michael, et al. Advances in standoff detection of trace explosives by infrared photo-thermal imaging[C]//*Proc. SPIE*, 2010, **7664**: 76641J.
- [98] Baranowski P, Lipecki J, Mazurek W, et al. Detection of apple bruises with the use of thermography[J]. *Acta Agrophysica*, 2005, **6**: 19-29.
- [99] Hellebrand HJ, Linke M, Beuche H, et al. *Horticultural products evaluated by thermography*[M]. AgEng. Press, 2000: 26-27.
- [100] G S Kim, G H Kim, D Y Kim, et al. Detection of Compressive Damage on Persimmon using Infrared Lock-in Thermography[C]//*Conference of Quantitative Infrared Thermography*, 2014.