



Infrared Thermal Wave Testing and Images Sequence Processing Technology

红外热波检测及其 图像序列处理技术

张金玉 杨正伟 田干 张炜 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

红外热波检测及其 图像序列处理技术

**Infrared Thermal Wave Testing and Images
Sequence Processing Technology**

张金玉 杨正伟 田干 张炜 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

红外热波检测及其图像序列处理技术/张金玉等著. —北京:国防工业出版社, 2015. 6

ISBN 978-7-118-10183-6

I. ①红... II. ①张... III. ①红外线检测—图形处理 IV. ①TN215

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 116614 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 17½ 字数 316 千字

2015 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 85.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

红外热波无损检测技术是近二十年来迅速发展并广泛应用的新型无损检测技术,具有检测速度快、非接触测量、结果形象直观、适用面广等特点,广泛应用于航空、航天、汽车、军工、新材料、石油化工、核工业及电力等众多领域,已逐步发展成为导弹、飞机等航空航天武器系统无损检测领域中一项最有发展前途的无损检测新技术。它的理论和应用研究,对于提高武器装备的安全可靠性具有重要的意义。红外热波检测的图像处理与识别技术作为红外热波无损检测与评定中的共性关键技术,对提高热波检测的速度、增加检测深度、改善检测效果,具有十分重要的意义,因而得到了世界许多国家的重视,美、加、法、日等国都对其进行了深入研究,并开发了相关检测设备。近几年来,随着高精度、高性能红外热像仪器的快速发展,其热像处理的理论与应用研究更加深入,成为学术界十分重视的研究课题。

在我们国家,该项技术也一直是无损检测和装备管理等领域的一个重要研究方向,20世纪80年代初,南京大学就开始这方面的研究工作;90年代,在国家自然科学基金的资助下,西安交通大学与北京交通大学等也开展了相关研究,并研制了相关设备;2003年该项技术的应用研究列入国家高技术研究发展计划(863计划),成立了热波检测技术联合实验室,相关研究更加活跃;近年来,国家自然科学基金等加大了该类课题的资助力度,有更多的大学和研究部门加入到红外热波无损检测技术的研究之中。

所谓的红外热波无损检测技术,事实上是通过外部热激励源对被测试件进行主动式加热,使物件内部的缺陷(如裂纹、腐蚀、脱粘等)以表面温度场异常分布的形式表现出来,通过红外热像仪实时记录这种表面温度分布随时间的变化情况并将其转换为可见光图像序列显示出来,再利用专门的红外热波图像分析处理方法,实现对含缺陷物件的无损检测和探伤。从这段定义中不难看出热波图像处理技术在热波无损检测中的地位和重要作用。红外热波图像的基本处理手段是滤波和增强,这是普通红外图像处理中都讨论的问题,但在热波检测中,其研究的重点则完全不同,不仅要研究热像的对齐和非均匀性校正,更重要的是研究热像数据的拟合、压缩与重构,研究热波数据的变化规律和热波传递模型,探讨多帧热像的信息融合与分离,进而研究更准确的图像分割和缺陷的定量识别方法。

目前,国外这方面的专著主要有2010年Michael Vollmer等的《红外热成像:原理、方法与应用》(Wiley)、2010年Otwin Breitenstain的《锁相热像法》(Springer)和2012年Raghu V. Prakash的《红外热像法》(InTech)等。国内有2006年李晓刚著的《红外热像检测与诊断技术》(电力出版社)、2011年邢素霞著的《红外热成像与信号处理》(国防工业出版社)等。总的来说,国外出版的相对比较新,著作较多,内容丰富,且有多次出版;国内出版的则侧重于工程应用、案例和硬件介绍,对红外热像处理与识别技术的专门论述较少,还未见到相关专门著作的出版。本书正是基于这样的考虑,将热波图像处理与识别的相关技术集结起来,做一个系统化的总结和概括。

全书共分为8章。第一章是绪论,主要介绍热波检测与图像处理的国内外发展情况及发展趋势;第二章是红外热波检测的基本原理,主要介绍热波原理和热传导机理,推导热波检测的公式,并作数值仿真和实际热波检测研究;第三章是热波图像序列数据的拟合、压缩与重建方法,这是本书的一个重点和特色所在,将讨论三种新型热波图像压缩与重构算法;第四章介绍热波图像序列专门处理方法,不仅有常用热波图像处理算法的介绍和比较,也有最新出现的算法的讨论;第五章讨论热波图像序列的配准与增强技术,重点介绍三种新的热波图像增强方法及其实验;第六章研究热波图像序列的融合与分离技术,将信息融合与盲源分离看成是信息提纯的两个方面,探讨多帧热波图像序列综合处理方法;第七章探讨热波图像分割技术,讨论几种新的红外热像分割技术;第八章论述热波图像的缺陷特征提取及定量识别技术,探讨一般缺陷的提取方法,并用神经网络模型研究缺陷的定量识别方法。

全书的主要内容是作者在国家自然科学基金(51275518、51075390、51305447)、省自然科学基金(2013SJJJ010、2011QNJJ003)以及军队多个重点项目的支持下,经过多年的红外热波无损检测技术研究、系统开发并进行工程应用而取得的成果的总结。本书的第一、三、四、五、六章由张金玉完成,第二、六、七、八章由杨正伟、田干、张炜完成。全书的许多内容是源自张勇、黄建祥、金国峰、宋远佳、王冬冬、罗文源、黄小荣、陈焱等的硕士和博士学位论文及其研究工作,在此对他们表示感谢!此外还要感谢课题组的其他成员所做的贡献。

由于作者水平有限,再加上时间仓促,错误与不当之处在所难免。我们诚恳地欢迎广大读者批评指正。

作者

2014年12月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 目的和意义	1
1.2 红外热波无损检测技术的研究现状与发展	3
1.2.1 红外热波无损检测技术的研究现状	3
1.2.2 热波图像处理的研究现状	7
1.3 存在的主要问题	11
1.4 红外热波检测的特点与应用	11
1.4.1 红外热波无损检测的技术特点	11
1.4.2 红外热波无损检测主要应用领域	12
参考文献	12
第二章 脉冲激励红外热波检测基本原理	16
2.1 红外热波检测的基本原理及关键技术	16
2.1.1 红外热波检测基本原理	16
2.1.2 红外热波检测关键技术	17
2.2 脉冲激励红外热波检测理论分析	18
2.2.1 导热微分方程	18
2.2.2 脉冲热激励条件下的瞬态热传导分析	19
2.2.3 含缺陷半无限大平板结构脉冲热激励条件下的表面 温度场分析	20
2.3 脉冲激励红外热波检测数值分析	22
2.3.1 数学模型及简化	22
2.3.2 初始条件及边界条件	23
2.3.3 划分网格及求解	24
2.3.4 数值计算结果与分析	24
2.4 脉冲激励红外热波检测试验	26
2.4.1 钢材料平底洞试件	26
2.4.2 钢板/绝热层粘接界面缺陷试件	27

2.4.3	复杂钢结构平底洞试件	28
2.4.4	玻璃纤维复合材料分层试件	29
2.4.5	蜂窝夹心复合材料试件	30
2.4.6	试验总结	31
2.5	红外热波检测影响因素分析	32
2.5.1	热成像系统的影响	32
2.5.2	热流注入方向影响	32
2.5.3	环境因素的影响分析	33
2.5.4	热激励源的影响分析	35
2.5.5	检测对象及缺陷参数对检测效果的影响	36
2.5.6	结论	41
2.6	小结	42
	参考文献	43
第三章	热波图像序列数据的拟合、压缩与重建方法	44
3.1	数据拟合原理	44
3.2	拟合优度评价参数	46
3.3	基于多项式拟合的红外热波图像数据处理方法	47
3.3.1	最小二乘法	48
3.3.2	多项式拟合法的基本原理	48
3.3.3	实验结果及分析	49
3.4	基于红外热波理论模型的热波图像数据拟合方法	54
3.4.1	模型的提出	54
3.4.2	非线性 Levenberg - Marquardt 拟合算法	54
3.4.3	实验结果及分析	55
3.5	基于遗传算法的热波图像序列数据拟合	57
3.5.1	热波图像序列数据拟合方法	57
3.5.2	实验结果及分析	58
3.6	基于差分进化的拟合方法热波图像处理	60
3.6.1	差分进化算法	61
3.6.2	双指数衰减模型	64
3.6.3	基于差分进化算法的双指数模型拟合法	65
3.6.4	实验结果及分析	66
3.7	热像序列的时空联合压缩与重建	71
3.7.1	时空压缩与重建的基本原理	71
3.7.2	基于 K - means 算法的时空压缩与重建方法	73

3.7.3 基于单帧图像分割的时空压缩与重建方法	80
3.8 小结	86
参考文献	87
第四章 热波图像序列的一般处理方法	89
4.1 概述	89
4.2 热波图像序列处理的基本方法	89
4.2.1 多帧累加平均法	90
4.2.2 正则化方法	91
4.2.3 差分法	91
4.2.4 多项式拟合法	92
4.2.5 脉冲相位法	93
4.2.6 比值热图法	94
4.3 不同处理方法的性能比较	94
4.3.1 实验试件和热波图像获取系统的设计	94
4.3.2 算法性能的比较	96
4.4 奇异值分解法	101
4.5 主分量分析法	103
4.5.1 主分量分析原理	104
4.5.2 热波图像序列主分量分析法	106
4.6 精密脉冲相位处理法	109
4.6.1 脉冲相位法存在的问题	109
4.6.2 基于复调制 Zoom-FFT 算法的实现	110
4.6.3 精密相位的实现	113
4.6.4 应用实例	115
4.7 小结	116
参考文献	116
第五章 热波图像序列的配准与增强技术	118
5.1 图像配准技术	118
5.1.1 常见图像配准方法	118
5.1.2 图像配准的基本框架	119
5.2 热波图像序列的配准	121
5.2.1 热波图像序列的几何形变及配准策略	121
5.2.2 热波图像序列拼接配准策略	122
5.3 基于遗传算法的热波图像序列配准	123

5.3.1	遗传算法的改进策略	124
5.3.2	基于灰度值修正权值的反距离插值技术	126
5.3.3	基于多种群自适应遗传算法的热波图像序列配准	127
5.3.4	配准实验结果分析	129
5.4	热波图像增强的一般方法和评估标准	132
5.4.1	图像时域增强	132
5.4.2	图像频域增强	134
5.4.3	图像质量评估标准	135
5.5	基于高频强调滤波的热像序列增强方法	137
5.5.1	高频强调滤波方法的原理	137
5.5.2	实验与结果分析	138
5.6	基于同态增晰技术的热像序列增强方法	141
5.6.1	同态增晰热像增强原理	141
5.6.2	实验及结果分析	142
5.7	基于微分的热波图像序列增强方法	150
5.7.1	基于一阶微分热波图像灰度翻转前后相减的图像 增强方法	150
5.7.2	基于二阶微分温度对比度图像灰度翻转前后相减的图像 增强方法	152
5.8	小结	155
	参考文献	155
第六章	热波图像序列信息的融合与分离技术	157
6.1	概述	157
6.2	图像融合技术	158
6.2.1	图像融合的定义及层次	158
6.2.2	图像融合的一般方法	159
6.3	基于图像差值的融合方法	161
6.3.1	差值图像的处理	162
6.3.2	融合系数的确定	162
6.3.3	基于遗传算法的热波图像序列融合	163
6.3.4	实验结果分析	164
6.4	基于小波变换的融合方法	167
6.4.1	热波图像的小波变换	167
6.4.2	热波图像的融合及融合规则	168
6.4.3	基于小波变换的热波图像区域融合	169

6.4.4	实验及结果分析	170
6.5	热波图像序列盲分离技术	174
6.5.1	热像盲源分离基础	174
6.5.2	基于 BSS 的热波图像数据处理方法	175
6.5.3	实验结果及分析	176
6.6	基于小波变换的热波图像序列盲分离方法	179
6.6.1	单帧热波图像小波变换的 BSS 分析法	179
6.6.2	多帧热波图像小波变换的 BSS 分析法	183
6.6.3	基于虚拟通道的小波变换 BSS 分析法	186
6.7	本章小结	189
	参考文献	190
第七章	热波图像分割技术	192
7.1	热波探伤的图像分割概述	192
7.2	经典图像分割方法	194
7.2.1	阈值分割方法	194
7.2.2	类间方差阈值分割方法	196
7.3	基于数学形态学的图像分割方法	198
7.3.1	数学形态学基本思想及运算规则	198
7.3.2	基于分水岭的图像分割方法	202
7.3.3	基于分水岭的热波探伤图像分割	202
7.3.4	结论	207
7.4	基于边缘检测的热图像分割	207
7.4.1	梯度边缘检测	207
7.5	基于改进遗传算法的二维最大类间方差热图像分割	209
7.5.1	二维最大类间方差算法	209
7.5.2	算法实现的步骤	211
7.5.3	实验结果	212
7.6	基于人工免疫技术的热波图像处理	213
7.6.1	二维最小 Tsallis 交叉熵	213
7.6.2	基于人工免疫算法的分割阈值优化	215
7.6.3	结果分析	217
7.7	基于尖点突变理论的红外热图像损伤边缘检测与分割	217
7.8	基于粒子群优化模糊聚类的红外热图像分割	220
7.8.1	粒子群算法	220
7.8.2	模糊聚类算法	220

7.8.3 基于粒子群优化的模糊聚类算法	221
7.8.4 实验结果与分析	222
7.9 本章小结	224
参考文献	224
第八章 热波图像的缺陷特征提取及定量识别	226
8.1 缺陷形状的图像识别	226
8.1.1 规则图形的识别	227
8.1.2 复杂图形的识别	228
8.1.3 改进的图形识别算法	230
8.1.4 复杂图形的尺寸提取	232
8.2 缺陷尺寸(大小)识别	233
8.2.1 二值链码技术	234
8.2.2 缺陷大小的测量	235
8.3 基于最佳检测时间的缺陷深度测量	239
8.3.1 导热系数比较小的材料(非金属或复合材料) 缺陷深度的判别	239
8.3.2 导热系数较大的金属材料的缺陷深度的判断方法	240
8.3.3 多元非线性回归求缺陷深度	242
8.4 基于 BP 神经网络的缺陷定量识别	244
8.4.1 BP 神经元的传递函数	244
8.4.2 BP 神经网络的结构及算法	244
8.4.3 基于 BP 神经网络的缺陷定量识别	246
8.5 缺陷三维显示和重建	250
8.5.1 缺陷的三维显示	252
8.5.2 缺陷的三维重建	254
8.6 本章小结	256
参考文献	257

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Objective and Significance	1
1.2 Research status and development of thermographic nondestructive technique	3
1.2.1 Research status of thermographic nondestructive technique	3
1.2.2 Research status of thermal wave image processing	7
1.3 The main problems	11
1.4 The characteristics and application of thermographic nondestructive inspection	11
1.4.1 The characteristics of thermographic nondestructive detection technology	11
1.4.2 The application of thermographic nondestructive inspection	12
References	12
Chapter 2 Principle of Pulse infrared thermal wave testing	16
2.1 The basic principle and key technology of thermographic nondestructive inspection	16
2.1.1 The basic principle of thermographic nondestructive inspection	16
2.1.2 The key technology of thermographic nondestructive inspection	17
2.2 Theory analysis of infrared thermal detection based on impulsive excitation	18
2.2.1 Differential equations of heat conduction	18
2.2.2 Analysis of transient heat conduction under pulse heat excitation	19
2.2.3 Analysis of surface temperature field of a semi infinite flat plate structure containing defect under pulse thermal excitation	20
2.3 Numerical analysis of pulse excitation	22
2.3.1 Simplified mathematical model	22
2.3.2 Initial and boundary conditions	23
2.3.3 Meshing and solution	24

2.3.4	Numerical results and analysis	24
2.4	Pulse infrared thermal wave detection experiment	26
2.4.1	Steel flat bottom holespecimen	26
2.4.2	Steel / insulation interface defects specimen	27
2.4.3	Flat bottom hole sample of complex steel structure	28
2.4.4	Glass fiber composite layered specimens	29
2.4.5	Honeycomb sandwich composite material specimen	30
2.4.6	Test summary	31
2.5	Analysis of influence factors	32
2.5.1	Effect of thermal imaging system	32
2.5.2	Direction of heat flow	32
2.5.3	Analysis of environmental factors	33
2.5.4	Influence of thermal excitation	35
2.5.5	Effect of object and defect parameters	36
2.5.6	Conclusions	41
2.6	Summary	42
	References	43

Chapter 3 Data fitting, compression and reconstruction method for thermal image sequence

3.1	Principle of data fitting	44
3.2	Assessment parameters of fit goodness	46
3.3	Infrared thermographic data processing method based on polynomial fitting	47
3.3.1	Least square method	48
3.3.2	Basic principle of polynomial fitting	48
3.3.3	Experimental results and analysis	49
3.4	Thermographic data fitting method based on the model of infrared thermal wave theory	54
3.4.1	Theory Model	54
3.4.2	Nonlinear Levenberg-Marquardt fit method	54
3.4.3	Experimental results and analysis	55
3.5	Thermographic Data fitting method based on GA	57
3.5.1	Thermographic Data fitting algorithm	57
3.5.2	Experimental results and analysis	58
3.6	Thermographic Data fitting method based on Differential	

evolution	60
3.6.1 Differential evolution algorithm	61
3.6.2 Double exponential decay model	64
3.6.3 Data fitting method based on differential evolution and doubleexponential model	65
3.6.4 Experimental results and analysis	66
3.7 Spatio temporal compression and reconstruction of image sequences	71
3.7.1 Principle of spatio temporal compression and reconstruction	71
3.7.2 Spatio temporal compression and reconstruction method based on K-means	73
3.7.3 Spatio temporal compression and reconstruction method based on Image segmentation	80
3.8 Summary	86
References	87

Chapter 4 Thermal image sequences Processing 89

4.1 Introduction	89
4.2 Basic methods of thermal image sequences	89
4.2.1 Multi-frame accumulation average method	90
4.2.2 Regularization method	91
4.2.3 Difference method	91
4.2.4 Polynomial fitting method	92
4.2.5 Pulse phase method	93
4.2.6 Ratio method of thermal image	94
4.3 Performance comparison of different methods	94
4.3.1 Design of the experimental specimens and thermal wave image acquisition system	94
4.3.2 Performance comparison	96
4.4 Singular value decomposition method	101
4.5 Principal component analysis method	103
4.5.1 Principle of principal component analysis	104
4.5.2 Principal component analysis method of thermal image sequence	106
4.6 Precision pulse phase method	109
4.6.1 Existing problem of pulse phase method	109
4.6.2 Zoom-FFT algorithm realization based on complex modulation	110