

几何形状导热反问题 方法与应用

范春利 著



科学出版社

几何形状导热反问题方法与应用

范春利 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以红外热像缺陷检测为背景,着眼于零件或设备内部缺陷的检测与定量识别,针对基于表面测温的试件内部简单形状缺陷、复杂形状缺陷、复杂形状多缺陷、试件或设备边界缺陷等的识别问题,提出了一系列行之有效的定量识别方案与方法,并通过数值算例和实验证明了算法的有效性;同时,对壁状结构内表面进行检测时可能出现的一种虚假缺陷现象进行了分析和讨论。

本书可作为高等院校能源、动力、机械、船舶和交通运输等专业的高年级本科生和研究生的参考教材,也可作为传热反问题、红外无损检测等相关领域科技人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

几何形状导热反问题方法与应用/范春利著. —北京:科学出版社,2015
ISBN 978-7-03-046127-8

I. ①几… II. ①范… III. ①导热-反演算法-研究 IV. ①O551.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 253304 号

责任编辑:朱英彪 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 10 月第一次印刷 印张:10 1/2

字数:209 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

对设备状态的监测、检测与故障诊断一直以来都是工程领域研究的热点,其中,零件或设备内部缺陷的检测就是一项重要的研究内容。近年来,随着红外热像仪精度的不断提高,红外无损检测技术由于具有非接触、无损伤、检测效率高、对检测者无伤害等优势而被广泛应用于钢铁、石化、冶金、电力和军事装备等各个领域,已经成为设备或零件缺陷检测的一种非常重要的技术手段。

缺陷的红外检测与识别是借助零件自身的发热、人工外加热或冷激励来使得零件内部的缺陷信息或边界缺陷信息体现在零件检测表面的温度分布上,从而通过热像仪测得这个温度异常来定性地判断缺陷的存在,或进一步根据红外热像图中读出的温度分布数据来定量地识别缺陷的尺寸、位置、形状和热物性等信息。目前,红外热像缺陷检测的应用范围非常广泛,不但可以应用到半无限大试件,如飞机蒙皮表面下缺陷的检测,而且还可以应用于有限尺寸试件,如设备的关键零部件,通过透射红外检测法可以检测到非常深层次的缺陷。然而,目前的缺陷检测工作大多还处于定性阶段,因此,从导热反问题角度出发,充分利用表面温度场与相关的热过程及热物性之间的内在联系,发展根据热像仪所测温度分布识别试件内部缺陷参数的方法及算法就显得非常重要了。

基于表面测温的试件内部或边界缺陷形状的识别问题隶属于传热反问题的研究范畴。传热反问题是相对于正问题而言的,它是利用在试件表面或内部所测量的温度或热流分布,来计算经典的传热正问题计算所需要的已知条件,如边界条件、热物性、求解区域形状等。传热反问题从数学上看属于非适定问题,因为温度或热流的测量误差常常会引起反问题计算结果的不稳定(这也是目前传热反问题方法研究中需要检验计算结果对温度或热流测量误差的灵敏性的原因),起初传热反问题并没有引起各领域学者的重视。最早的几个具有启发意义的求解传热反问题的方法是在 20 世纪 50 年代提出的,主要来源于单纯的对该类问题求解的直觉,而不是严格的数学推导。接着在 60~70 年代,Tikhonov、Alifanov 和 Beck 等提出了多种反问题求解方法,并且大多一直沿用至今。这些方法主要利用正则化技术将反问题当成一个近似的正问题来处理。目前,对于求解区域形状识别问题的研究还非常缺乏,尤其是与红外无损检测联系紧密的基于表面测温的内部缺陷的识别问题,尚缺乏行之有效的解决方案。

作者自攻读博士学位至今,在国家自然科学基金和相关军队课题的支持下,一直从事相关定量红外无损检测、几何形状导热反问题、舰船设备红外检测与故障诊

断等科研工作。本书整理了部分相关研究结果,以红外无损检测领域的应用为目的,对试件内部缺陷以及外边界缺陷的导热反问题提出了一系列行之有效的求解方法,算法的有效性通过数值算例和实验进行了验证。

全书共9章,第1章介绍缺陷红外检测与识别的研究背景和现状;第2章结合常用的红外缺陷检测方式,通过数值模拟对红外检测过程中检测表面的温度分布特征进行分析和对比;第3~5章对基于表面测温的试件内部缺陷的识别方法进行研究和探讨;第6、7章对设备或试件内部表面缺陷的检测和定量识别方法进行研究和探讨;第8章通过实验研究对第7章所提出的算法进行进一步的验证,并以该算法为例着重探讨算法在实际应用中所面临的困难和问题;第9章对虚假缺陷现象的形成原因和形成条件进行分析和讨论。

本书相关的研究工作一直是在海军工程大学的孙丰瑞教授和杨立教授的指导下进行的,特此向两位恩师表示衷心的感谢。本书部分研究内容在全国传热年会上多次得到哈尔滨工业大学能源科学与工程学院刘林华教授的指导和帮助,在此表示诚挚的谢意。感谢研究生王海亮、曹明宇、贾文抖和张林等参与了本书的部分整理和校对工作。感谢我的家人对我工作的理解、支持和鼓励。

本书的研究工作和出版得到了国家自然科学基金(51479203、50906099)、海军工程大学学术专著出版基金的资助,在此表示感谢。

限于作者水平,书中难免有不妥或需进一步改进之处,恳请读者提出宝贵意见和建议。

作 者

2015年8月

目 录

前言

第 1 章 缺陷红外识别的研究背景及现状	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 红外缺陷检测的发展和研究现状	2
1.3 传热反问题理论的产生和发展	5
1.4 几何形状识别类导热反问题的研究方法综述	6
1.5 本书的研究范围和研究方法	7
参考文献	8
第 2 章 常用红外缺陷检测方式的传热分析	22
2.1 概述	22
2.2 导热微分方程	23
2.3 离散化方程的推导	24
2.4 有限尺寸试件检测过程的传热分析	26
2.4.1 稳态检测方法	26
2.4.2 瞬态检测方法	30
2.5 半无限大试件的高功率短脉冲检测法	33
2.6 本章小结	37
参考文献	38
第 3 章 基于 L-M 算法的简单形状内部缺陷参数的识别	39
3.1 概述	39
3.2 L-M 算法缺陷参数识别的求解过程	39
3.2.1 导热正问题求解	40
3.2.2 缺陷参数识别的导热反问题描述	41
3.2.3 L-M 算法反问题求解的迭代公式推导	41
3.2.4 迭代求解的计算步骤	43
3.3 二维识别算例	43
3.3.1 二维缺陷试件内部传热的数理模型	43
3.3.2 L-M 算法中参数的描述与选取	44
3.3.3 二维试件检测表面的温度分布规律	44
3.3.4 二维缺陷识别结果及讨论	46
3.4 三维识别算例	48

3.4.1 三维缺陷试件检测表面的温度分布规律	48
3.4.2 三维缺陷识别结果及讨论	49
3.5 本章小结	51
参考文献	52
第4章 基于共轭梯度法的不规则内部缺陷参数的识别	54
4.1 概述	54
4.2 共轭梯度法缺陷参数识别的求解过程	54
4.2.1 导热正问题求解的数学物理模型	55
4.2.2 内部边界形状参数识别的导热反问题描述	55
4.2.3 共轭梯度法的迭代公式	56
4.2.4 迭代收敛的判断条件	56
4.2.5 迭代求解的计算步骤	56
4.3 共轭梯度法在管道内壁形状识别中的应用	57
4.3.1 内部缺陷的红外特征规律	57
4.3.2 内壁缺陷识别的模拟实验结果	59
4.4 共轭梯度法在发热型内部缺陷形状识别中的应用	64
4.4.1 试件及缺陷本身导热系数对识别结果的影响	64
4.4.2 缺陷边界离散点个数对识别结果的影响	65
4.4.3 检测表面最大温差对识别结果的影响	66
4.4.4 发热强度估计误差和温度测量误差对识别结果的影响	67
4.5 共轭梯度法在外边界加热内部缺陷形状识别中的应用	69
4.5.1 直接应用共轭梯度法的识别结果	70
4.5.2 缺陷试件内部传热分析	71
4.5.3 多次测量综合法的提出及其缺陷识别结果	73
4.6 本章小结	76
参考文献	77
第5章 基于识别参数转化和遗传算法的内部多缺陷识别	78
5.1 概述	78
5.2 缺陷形状识别到导热系数分布识别问题的转化	78
5.2.1 问题提出及求解问题说明	78
5.2.2 识别问题转化	80
5.3 遗传算法概述和参数选择	80
5.3.1 简单遗传算法概述	81
5.3.2 缺陷识别的遗传算法描述	82
5.4 后处理方法	85

5.4.1 多次识别结果统计	85
5.4.2 缩小范围二次识别	86
5.4.3 围棋规则	86
5.5 计算步骤	87
5.6 数值算例及讨论	88
5.6.1 数值算例:单个缺陷	88
5.6.2 数值算例:多个缺陷	90
5.6.3 数值算例:复杂形状缺陷	92
5.6.4 数值算例:任意形状缺陷	92
5.6.5 数值算例:网格密度的影响	93
5.7 本章小结	93
参考文献	94
第6章 一维修正算法的改进及其在边界识别中的应用	95
6.1 概述	95
6.2 一维修正算法简介	95
6.2.1 迭代公式的推导	96
6.2.2 边界形状识别的迭代步骤	96
6.2.3 修正项的计算	97
6.3 一维修正算法的改进	97
6.3.1 迭代公式的修正	97
6.3.2 修正项计算方法的改进	98
6.3.3 收敛条件的给出	98
6.4 改进的一维修正算法在管道内壁边界形状识别中的应用	99
6.4.1 管道内壁边界识别问题描述	99
6.4.2 改进一维修正算法描述	100
6.4.3 算例和讨论	101
6.5 改进的一维修正算法在交界面形状识别中的应用	108
6.5.1 交界面形状识别问题的正问题描述	108
6.5.2 区域交界面形状识别问题的改进一维修正算法描述	109
6.5.3 算例和讨论	110
6.6 本章小结	120
参考文献	121
第7章 基于有效导热系数识别的间接边界形状识别方法	123
7.1 概述	123
7.2 圆管内边界的间接识别方法	123

7.2.1 管道内边界识别的正问题描述	124
7.2.2 管道内边界形状的间接识别方法描述	124
7.2.3 数值算例与讨论	127
7.3 板状结构内边界的间接识别方法	133
7.3.1 边界识别问题的数学描述	133
7.3.2 基于共轭梯度法的板状结构内边界识别方法简述	134
7.3.3 数值算例与讨论	135
7.4 本章小结	140
参考文献	140
第8章 识别算法的实验研究	141
8.1 概述	141
8.2 实验台及实验件	142
8.3 实验测量与计算结果	143
8.3.1 实验件Ⅰ的缺陷识别过程和结果	144
8.3.2 实验件Ⅱ的缺陷识别结果	146
8.4 本章小结	147
参考文献	148
第9章 内壁面缺陷间接红外检测中的虚假缺陷现象分析	149
9.1 概述	149
9.2 虚假缺陷现象的传热分析	150
9.2.1 伸展体试件传热模型	150
9.2.2 试件的网格划分	151
9.2.3 伸展体截面半径对临界表面传热系数的影响	152
9.2.4 伸展体长度对临界表面传热系数的影响	154
9.2.5 虚假缺陷现象表面最大温差的影响因素分析	155
9.2.6 低导热系数试件中的虚假缺陷现象	157
9.3 本章小结	157
参考文献	158

第1章 缺陷红外识别的研究背景及现状

1.1 研究背景及意义

目前,随着科学技术的发展,人们对各种设备以及零部件的可靠性及使用寿命的要求越来越高,因而,对于设备状态的检测、监测和故障诊断的研究也成为国内外相关领域的热点。零件或设备内部缺陷及故障的检测与定量识别便是其中一项重要的研究内容。

在各类设备故障中,除在长期运行中因化学、电、热或机械等原因逐步引起的设备老化或失效外,还有不少故障是由所用材料和零件本身存在或运行过程中逐渐形成的缺陷所致。一旦条件成熟,这些故障隐患就会发展扩大,以致酿成重大设备事故。例如,我国曾多次发生的由于内部缺陷引起的高压绝缘工具和复合绝缘管材突然闪络击穿而引起的爆炸,导致电气设备和超高压输电线路发生事故;再如,定子线棒内部的砂眼引起局部过热并诱发绕组绝缘故障,致使整台大型电动机停止运转^[1]。这些内部缺陷大部分可以通过红外检测的方式在零件的生产、加工过程中予以发现,从而可以避免事故的发生。因此,对于红外无损检测技术,尤其是定量红外识别技术的研究无疑具有重要的意义。

缺陷边界的红外检测与识别是借助零件自身的发热、人工外加热或冷激励来使得零件内部的缺陷信息、边界缺陷信息体现在零件检测表面的温度分布上,从而通过热像仪测得这个温度异常来定性地判断缺陷的存在,再根据红外热像图中读出的温度分布数据来进一步定量地识别缺陷的尺寸、位置、形状和热物性等信息。目前,红外热像缺陷检测的范围不断扩大,它不仅可以应用到半无限大试件,如飞机蒙皮表面下缺陷的检测,而且可以应用于有限尺寸试件,如设备关键零部件的检测,通过透射红外检测法还可以检测到非常深层次的缺陷。

缺陷红外识别算法的研究是红外无损检测技术从定性到定量发展的迫切需要。近年来,随着红外热像仪精度的提高以及红外无损检测技术在各个领域的广泛应用,对于零件缺陷检测的研究也取得了长足的发展和广泛的应用。但目前的大部分工作还停留在定性的水平上,即通过测量一定加热(或零件及故障自身发热)条件下试件表面的温度异常,结合检测者的经验,来定性地判断零件是否存在缺陷。然而,设备关键零部件内部的缺陷对设备可靠性往往有着致命的影响,因此这种经验性的判断必然会限制对零件乃至整个设备故障程度的准确判断,从而延

误消除故障隐患的时机。因此,从导热反问题角度出发,充分利用表面温度场与相关的热过程及热物性之间的内在联系,发展根据热像仪所测温度分布,定量地识别试件内部缺陷参数的算法就显得非常重要了。定量红外识别算法的研究是红外无损检测技术从定性到定量发展的重要理论研究课题。

另外,缺陷红外识别算法的研究也是完善传热反问题理论的需要。缺陷识别问题隶属于导热反问题,是传热反问题的一个分支。20 世纪 80 年代,随着大型高速计算机的出现以及 Tikhonov、Alifanov 和 Beck 等在算法上的突破,传热反问题的研究取得了迅速的发展。目前已在初始条件、边界条件、热物性等的识别方面取得了非常广泛的应用。然而,对于求解区域形状的识别问题(inverse geometry problem),如求解区域部分外边界或内部边界的识别等的研究还非常缺乏,并且,对于目前已经发展的识别算法,其初始、边界条件等也和真实的检测问题相距甚远,无法应用到实际的缺陷红外检测工作中。因此,本书针对从红外无损检测实际提炼出来的缺陷识别问题,从试件内部的传热机理出发,开展试件缺陷边界的导热反问题识别算法研究也是完善传热反问题理论的需要。

1.2 红外缺陷检测的发展和研究现状

红外检测技术是在红外技术的产生和发展中逐步建立和发展起来的。起初,红外现象是由德国科学家赫谢尔在 1800 年的某一天测量太阳光色温度时发现的,这是人类历史上第一次发现肉眼不可见的光——红外线;1887 年,人工产生的红外线让人们进一步在本质上认清了红外线;到了 20 世纪,由于社会生产实践的需要,红外技术这一门崭新的技术学科逐渐形成,并走上了生产应用的道路;而第二次世界大战军工上的应用则奠定了红外技术发展的基础,引起各军事强国对这一技术的关注和研究。

红外技术最早应用到无损检测领域中可追溯到 20 世纪 60 年代,Green 和 Alzofon 率先对红外无损检测技术的基本原理和应用进行了阐述^[2],在早期发表的一些学术论文中主要涵盖温度及表面辐射测量液晶和扫描系统的应用、生物环境遥感和医疗应用、裂纹和缺陷的检测等^[3]内容。此时红外检测技术的发展还不充分,相对于其他检测手段的优势还没有体现出来,所做的工作也都局限在定性检测和分析上。

进入 20 世纪 70 年代,国外的研究者开始将热传导理论应用到红外无损检测中,主要以 Carlslaw^[4]所做的工作为代表。随后研究者开展了均质体的热传导研究,主要工作涉及不同热/冷激励施加条件下一维和二维热传导模型及其相应的解析解、数值解,引领了该技术由定性检测向定量化识别方向发展的趋势。

到了20世纪80年代,伴随着性能更加先进的红外热像仪的研制成功以及现代化的信号数据化处理技术的发展应用,各国的红外无损检测专家先后提出一些新的红外检测与评估技术手段,主要包括脉冲热成像技术^[5-8]、锁相热成像技术^[9,10]、脉冲相位热成像技术^[11-13],进一步促进了该技术的发展,拓宽了红外无损检测在军用和民用领域应用的广度和深度,使得该技术进入了蓬勃发展的时期。

从全世界范围来看,红外无损检测技术在美国、瑞典、加拿大、日本和英国等国家发展最快、最为完备,并取得了很多实际应用成果。在20世纪60年代,瑞典率先将红外热像检测技术运用到对电力设备故障的诊断中;意大利的米兰地区将红外热像检测技术应用到电力系统中后,设备故障率由1970—1975年的1%下降到1975—1978年的0.5%;美国、加拿大、俄罗斯和法国等国家已把红外检测技术应用到飞机蒙皮和飞机复合材料的检测之中。在美国的航空航天领域,该技术已成为继超声、射线检测技术后的又一常用的检测方法。美国无损检测学会已将红外检测技术列入特种设备检测方法之中,并相应地开展了Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级无损检测人员的培训及考核工作^[14]。

我国的红外无损检测技术开展的也比较早,从20世纪60年代初火箭发动机检测中的应用到80年代薄壁或复合材料缺陷、金属管内腐蚀以及焊接缺陷等的红外无损检测,科研人员对红外无损检测的技术理论研究和应用做了大量的工作。我国较早开展红外检测技术研究的单位是中电集团第11研究所和中国兵器工业集团第二一一研究所,自20世纪70年代以来,已有许多单位进行了相关的技术研究,推动了红外检测技术在我国的发展。目前,开展该项技术研究工作的单位主要有西安交通大学、首都师范大学、大连理工大学、重庆大学、武汉大学、北京航空航天大学、南京大学、同济大学、海军工程大学、哈尔滨工业大学、中国科学院工程热物理所、昆明物理所等,研究所涉及的应用方面主要有:在航空航天领域,主要用来监测航空发动机状态、检测壳体脱粘等^[15-18];在电力行业,主要用来检测输电线路的接头、线路泄漏电流增大、绝缘部件的老化等^[19-22];在电子工业领域,主要用来检测工作电路板的发热状态及故障^[23,24];在石油化工领域,主要是对高温高压容器和管道、保温层及储液设备内部液位等进行检测^[14,25,26];在医学方面,主要用来检测乳腺癌及皮肤病^[27,28];在材料探伤方面,主要检测工件设备内部由空穴、裂纹、焊缝及冲击等造成的缺陷^[29-33];在钢铁冶炼方面,主要对钢锭的温度及内部空腔、加热炉衬里的损伤进行诊断^[34-36]。此外,该技术还广泛应用于建筑安全^[37]、火灾防护^[38]、地震监测^[39]、应力分析^[40]、食品安全^[41]、产品质量的管理和检测^[42]等。

作者所在的海军工程大学热力工程教研室也是在国内较早开展红外热像检测工作的单位之一。本教研室在1984年引进了瑞典的AGA782型热像仪,开展电子线路板红外故障诊断工作,并获得军队科技进步奖三等奖。同时与地方单位合作,开展了输电线故障诊断、乳腺癌筛查等一系列研究和应用工作,取得了良好的

经济效益。近年来,本单位结合海军装备的发展,开展了舰艇电气设备、机电设备、动力装置和热力设备等一系列红外故障诊断工作,开发了相应的检测系统,研究成果于2007年获得军队科技进步奖二等奖。在国家自然科学基金的资助下,开展了红外故障诊断中的零件内部缺陷定量识别问题、几何形状传热反问题等研究工作。本书内容就来源于其中的部分工作。

作为新兴的无损检测技术,红外无损检测技术在国民经济的众多行业中逐步得到广泛的实际应用,尤其是在电力、石油化工和钢铁冶炼等行业中显示出自身的优势。然而从整体上来看,当前该技术的发展还不成熟,大多数检测工作仍停留在定性分析上,且这些故障检测工作通常是建立在以往所积累的大量数据及检测者自身工作经验的基础之上,这种定性判断往往受到人的主观因素的影响,容易对故障的严重程度做出误判,对某些设备运行状态要求较高的场合难以给出定量的评判。因此,开展定量检测与识别方面的研究工作是红外无损技术发展的迫切需求和必然趋势,对提高红外故障诊断的准确性具有重要意义。

目前,工程中常用的红外无损检测方法可简单归纳为如下几类。

(1) 稳态检测方法^[43-49]。该方法是在试件自身的发热或人工施加热激励的情况下,当试件内部的温度达到稳态时对试件表面温度分布进行检测来识别缺陷或故障。该方法在设备在线故障检测与诊断方面具有非常广泛的应用。

(2) 瞬态检测方法^[50-68]。瞬态方法是与稳态方法相对应的。由于零部件在接受热激励后整体温度场还未达到稳态时,检测表面的温度差异往往有一个比较明显的变化过程。因此该方法是在温度变化的动态过程中采集温度分布信息,来对设备或零件内部的缺陷情况进行判断。

(3) 锁相热像检测方法(lock-in thermography)^[9,10,69-80]。该方法是通过对试件检测表面施加一个按一定规律周期性变化(大多采用正弦规律变化)的热激励,并通过采集检测表面温度分布随时间的变化数据,进而分析检测表面各个像素点温度响应(如波形中的幅值和相位等)的差异来对缺陷位置进行判断的一种检测方法。该方法常用于浅表缺陷的检测。

(4) 脉冲相位检测方法(pulsed phase thermography)^[11-13,81-84]。对于锁相热像检测方法,由于施加热波的频率对识别结果产生明显的影响,所以对加热热波的频率要求比较严格,在实际应用过程中,往往要通过多次检测才能得到最佳的检测结果。而本方法只需对试件施加一个脉冲热激励,通过傅里叶变换,直接可以得到各个频率下检测表面温度变化规律(如幅值、相位等)上的差异,从而对缺陷信息进行判断,使得检测效率大大提高。

上述几类检测方法已在工程中得到比较广泛的应用。目前的红外无损检测技术研究主要有两个方向:一个是扩展检测范围;另一个是提高检测的精度,也就是定量化识别研究。对于上述后两种检测方法,尽管也有一些对于缺陷大概面积以

及深度的估计方法,但其主要以定性或半定量研究为主,本书不做过多讨论。而前两种检测方法具有非常大的研究空间,在这两种检测方法下,可以利用检测表面所测温度信息,借助导热反问题理论来对整个缺陷的形状、位置、材料属性等参数进行详细的评估和识别。

1.3 传热反问题理论的产生和发展

导热反问题(inverse heat conduction problem, IHCP)是传热反问题(inverse heat transfer problem, IHTP)的一个分支。导热反问题是相对于导热正问题而言的。一般来说,它是依据试件边界(或内部)一点或多点的温度信息来反推一般传热问题中的已知量,如边界条件、初始条件、材料的热物性、热源强度、物体的几何边界形状等参数。它是一门涉及传热学、数学、计算机和实验技术等多个领域的交叉学科。

最早的传热反问题要追溯到1955年, Giedt^[85]首次以枪管内壁的传热问题,对传热的反问题进行了探讨。随后在1960年, Stolz^[86]编制了淬火过程中依据内部测温点对表面温度分布和热流密度进行计算的反问题求解程序。传热反问题发展的最早推动力来源于20世纪50~60年代的空间计划。对于飞行器返回大气层时外表面温度的测量问题,由于无法直接测量飞行器外表面的温度,所以将测量元件安装在壳体热表面以下,通过测量的温度结果来反推壳体外表面的温度分布情况。

传热反问题求解的最大困难就是数学上所描述的非适定性^[87-92],它是对应于传热正问题的适定性来说的。适定性的概念最早是由Hadamard^[88]所提出的,一个适定问题的解必须满足存在、唯一、稳定(当输入具有一定误差时,必须有稳定的解)等条件。与此相对应,对于传热反问题,解的存在性可以从物理问题实际来确定,例如,对于一个瞬态问题,温度的分布发生了改变,必然是由一定参数的变化所引起,如边界条件、几何条件等。对于一些个别的反识别问题,也可以有严格的解的唯一性的证明,尽管对于大多数问题还必须从物理问题来对解的有效性进行判断^[53,54],但反问题的解的最大问题仍是当温度分布测量结果具有一定误差时可能会使某些参数的反计算结果具有不可预见的误差。因而,在计算的过程中,必须借助一些技术手段来确保计算结果的稳定性,从而检验一个反问题计算方法是否有效,也主要是讨论计算结果对温度测量误差的灵敏性。

一直以来,人们认为当适定性条件不满足时反计算问题是没有解的或者即使能够得到解也是无效的。但随着Tikhonov的正则化方法(regularization procedure)^[89,93-95]、Alifanov的迭代正则化方法(iterative regularization techniques)^[87,91,96-109]以及Beck的方程估计法(function estimation approach)^[92,110]的提出,又重新提起了人们对传热反问题研究的巨大兴趣,并在20世纪末取得了较大的进展,直到今天,传热反问题无论在算法的研究上还是工程应用上都已成为传

热领域的重要研究内容。

1.4 几何形状识别类导热反问题的研究方法综述

随着传热反问题理论不断发展,导热反问题研究的许多方面都取得了非常明显的进步,并且发展出一系列的计算方法,如温度分布的识别^[111-131]、边界热流密度的识别^[131-146]、对流换热系数的识别^[147-154]、材料热物性的识别^[155-173]和发热源项的识别^[174-185]等。然而,由于红外无损检测技术的应用较晚,目前对于试件边界(或缺陷边界)进行识别的几何反问题研究还非常缺乏,有待进行深入研究。

缺陷边界识别算法的研究是伴随红外无损检测在各个领域应用的深入而逐渐发展起来的,因而其研究可以大概分为两类:第一类是与红外无损检测工程实际联系紧密的经验、半经验的识别方法研究;第二类是从导热反问题理论研究入手的识别算法研究。

经验、半经验的缺陷边界识别方法主要利用不同缺陷参数与缺陷红外特征的相互关系来对缺陷参数进行评估,是建立在检测者的经验或丰富的实验数据基础之上的,目前发展的主要方法如下。

(1) 人工神经网络法^[186-189]。通过求解传热正问题得到缺陷表面的温度分布特征来对神经网络进行训练,从而用来识别实际问题中的缺陷信息。

(2) 图像处理法。该方法在大量检测经验基础上,通过在一张热像图的温度分布中取一个阈值来估算缺陷的宽度或面积^[190],或者通过瞬态检测中的红外图像序列来研究各个像素点的温度变化速率差异来判断内部缺陷信息^[191]。

(3) 热波检测法。该类方法通过单一波形热波加热试件条件下得到的检测表面的红外热图序列来观察检测表面各个像素点温度响应波形的差异来对内部缺陷进行判断^[192],或对短脉冲加热条件下检测表面各个像素点的温度变化时间序列进行时频分析得到各个频段上检测表面的幅值和相位分布图,从而对缺陷信息进行判断^[69-84, 193]。

以上这些方法的主要优点是直观、简单、不需要复杂的数学计算、与应用实际结合紧密等。缺点主要有:①通用性不强,多数方法只适用于特定形状的试件;②能够识别的缺陷参数有限,多数方法只能大概估计缺陷的面积或与检测表面的距离,识别精度相对较低;③识别精度依赖于大量的实验数据和检测者的经验。所以,要发展通用的、精确的可以在红外无损检测中得到广泛应用的识别算法,必须从缺陷试件内部的传热机理出发,利用传热反问题理论来进行研究。

导热反问题缺陷边界识别方法主要从试件内部的热量传递规律出发,大多是通过搜索内部缺陷边界的参数,使得试件检测表面的温度分布与实际检测温度分布相吻合来实现的。

1. 简单形状缺陷的主要识别方法

对于简单形状缺陷,通常可用如下几种识别方法。

(1) 一维简化法^[194]。该方法主要是针对薄壁试件所采用的一维近似算法。

(2) 内部匹配法^[195]和数值搜索法^[196]。这两种方法是最早开展的内部缺陷的识别算法,是针对立方体试件中的立方体缺陷的一种特殊识别算法。其识别精度较高,但通用性较差。

(3) 遗传算法等优化算法^[197,198]。该类方法按一定规则搜索缺陷的参数,使得所计算出来的检测表面温度分布趋近于红外检测得到的温度分布,从而得到内部缺陷的参数。这类算法精度较高、通用性好,但必须预先知道缺陷的形状或缺陷的描述参数,参数较多时,误差较大。

2. 复杂形状缺陷的主要识别方法

对于复杂形状缺陷,可采用如下两种识别方法。

(1) 共轭梯度法^[199-203]。对于复杂形状边界识别,目前应用最广泛的就是共轭梯度法,已在一个方向的外边界形状、交界面形状识别等方面取得了初步的应用。该方法不需要预先知道缺陷的参数信息,具有收敛速度快、受温度测量误差影响小的特点。遗憾的是,目前的大部分应用还停留在比较简单的单个方向的外边界形状识别问题上,并且,温度的采集点大多选在距离识别部位较近的试件内部,与实际红外无损检测的应用相距甚远。

(2) 虚拟边界法^[204-208]。该类方法是针对试件未知边界识别问题的。它通过虚拟区域和真实试件区域组成一个新的规则形状的温度求解区域,求解传热正问题得到总区域的温度分布,再根据所求边界的边界条件,找到符合特定温度分布规律的曲面来得到所求边界的形状。该方法思路比较简单,但对于多维、多个缺陷轮廓的描述相对比较困难。

综上所述,目前国内外所进行的导热反问题缺陷识别算法的研究还处在起步阶段,所研究的模型相对比较简单,且多数研究中温度采集位置选在与缺陷边界较近的试件内部,与红外检测的表面温度采集方式相差较远。由于内部采集的温度和表面采集的温度对缺陷参数变化的敏感程度大不相同,同一算法的精度和效果也就大不相同。目前发展的识别算法还远远不能满足实际定量检测工作的需要,还必须对该问题进行深入的研究。

1.5 本书的研究范围和研究方法

本书以红外缺陷检测为应用背景,着眼于红外无损缺陷检测的实际,针对基于表面测温的孤立试件内部单个简单形状缺陷、复杂形状单个以及多个缺陷、试件边

界缺陷、交界面形状等的识别方法进行了研究和讨论。但本书只是采用从实际检测问题中抽象出来的典型试件尺寸、形状以及类似的边界条件等来对识别算法进行研究,并主要检验对反问题算法有效性具有重要影响的温度测量误差、识别算法中的初始假设、材料属性等因素对识别结果的影响。对算法的具体应用方面的问题,本书不做过多讨论。需要说明的是,书中对于内部缺陷和内壁缺陷等的划分并没有严格的界限,大多数情况下只是为了描述方便,如管道内壁形状的识别,既可以看成是一个环形区域边界的识别,也可以看成是一个圆形区域的内部空洞缺陷边界的识别。

本书均针对稳态检测方式下的识别问题进行研究,主要采用导热反问题研究通用的数值验证方法来对算法识别结果的有效性进行检验^[209]。采取数值验证方法主要基于两点原因:①所研究的导热问题均有成熟、精确、可靠的数值解法,完全可以通过数值计算来模拟检测表面的温度分布情况;②导热反问题计算方法的有效性主要在于识别结果对温度测量误差的灵敏性^[88],数值验证可以方便地在精确的温度分布中添加大小可控的均匀误差或随机误差来检验算法对误差的反应,从而对算法的有效性进行判断。当然,在第8章也对算法的实验验证问题进行了探讨,并通过实验研究分析了算法应用中的主要影响因素以及着重需要研究的问题。

红外热像测温中同一热像图的温度测量误差相差不大,可以近似为均匀误差,但为了更好地检验算法的可靠性以及在其他测温方式下的通用性,书中仍对分布于各个所选温度点的随机误差的影响进行讨论。

参 考 文 献

- [1] 陈衡,侯善敬. 电力设备故障红外诊断 [M]. 北京:中国电力出版社,1999.
- [2] 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.
- [3] 陈衡. 我国红外诊断技术的现状与展望 [J]. 激光与红外,1998,28(5):292-296.
- [4] Carslaw H S. Conduction of Heat in Solids [M]. London:Oxford University Press,1959.
- [5] 李美华,曾智,沈京玲,等. 脉冲红外无损检测缺陷深度定量测量的数值模拟[J]. 红外与激光工程,2013,42(4):875-879.
- [6] Bu C W, Tang Q J, Liu J Y, et al. Inspection on CFRP sheet with subsurface defects using pulsed thermographic technique[J]. Infrared Physics and Technology, 2014, 65(7): 117-121.
- [7] Tang Q J, Liu J Y, Wang Y, et al. Inspection on SiC coated carbon-carbon composite with subsurface defects using pulsed thermography[J]. Infrared Physics and Technology, 2013, 60: 183-189.
- [8] Xue S W, Hong W M, Zu X T. Thermal pulse video thermography nondestructive testing of the defects in carbon steel[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(4): 446-449.
- [9] Liu J Y, Tang Q J, Liu X, et al. Research on the quantitative analysis of subsurface defects for