

硕士学位论文

碳纤维机翼缺陷的锁相红外无损检测研究

**NON-DESTRUCTIVE TESTING RESEARCH OF
CFRP AIRFOIL DEFECTS BASED ON LOCK-IN
INFRARED THERMOGRAPHY**

薄纯强

哈尔滨工业大学

2018 年 12 月

国内图书分类号：TN219

学校代码：10213

国际图书分类号：621

密级：公开

工学硕士学位论文

碳纤维机翼缺陷的锁相红外无损检测研究

硕 士 研 究 生：薄纯强

导 师：胡泓教授

申 请 学 位：工学硕士

学 科：机械电子工程

所 在 单 位：哈尔滨工业大学（深圳）

答 辩 日 期：2018 年 12 月

授予学位单位：哈尔滨工业大学

Classified Index: TN219

U.D.C: 621

A dissertation submitted in partial fulfillment of
the requirements for the academic degree of
Master of Engineering

**NON-DESTRUCTIVE TESTING RESEARCH OF
CFRP AIRFOIL DEFECTS BASED ON LOCK-IN
INFRARED THERMOGRAPHY**

Candidate:	Chunqiang Bo
Supervisor:	Prof. Hong Hu
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Mechatronic Engineering
Affiliation:	Harbin Institute of Technology, Shenzhen
Date of Defence:	December, 2018
Degree-Conferring-Institution:	Harbin Institute of Technology

摘 要

碳纤维复合材料作为飞机机翼的主要构成材料，在制造过程中由于碳纤维本身性质以及工艺系数控制等差异，很容易产生分层、脱粘等缺陷。而目前传统的无损检测研究相对滞后，影响了碳纤维材料在航空领域的继续发展。与其他方式相比，锁相红外无损检测具有非接触、高效快速等优点，因此成为本课题对机翼缺陷进行无损检测研究的不二选择。

针对目前碳纤维机翼缺陷定量化研究中以平底孔模拟缺陷的现状，本课题将内置聚四氟乙烯薄膜的碳纤维复合材料作为研究对象。为确定无损检测系统热源加载参数，本课题完全依照实物构建了三维导热模型，并对样本施加正弦式周期激励。通过仿真结果，分析研究了在不同缺陷尺寸、深度、热源加载频率以及材料属性的条件下，样本缺陷区域与无损区域表面温度场分布情况。在此基础上，探究了缺陷尺寸及深度对最佳检测频率以及最佳检测时间的影响，为后续的实验提供了参考依据。在以上研究的基础上，本课题完成了锁相红外无损检测实验平台的搭建，并对红外相机相关参数进行了校正。在综合评价多种滤波方法后，最终选用高斯滤波对红外图像序列进行预处理。在此基础上，分别采用多帧累加平均与差分法、快速傅里叶变换法以及主成分分析法三种图像序列算法对样本缺陷特征信息进行了提取。根据红外图像序列处理的结果，本课题通过图像分割等图像后处理手段与相位偏移以及灰度三维重建等技术实现了缺陷的可视化研究。在对红外相机进行标定后，利用极值及导数等数值分析方法完成了对缺陷位置、尺寸等信息的判定，并利用超声 C 扫描等手段辅助完成了实验结果准确性验证以及误差原因分析，最终实现了缺陷的定量化研究。

为验证研究效果，本课题分别对内置聚四氟乙烯缺陷以及平底孔缺陷的碳纤维复合材料样本进行了实验。在红外热波图像序列处理的基础上，本课题完成了对缺陷的可视化与定量化估计分析，并取得了良好效果。实验表明：本课题搭建的红外无损检测平台具有较高的可靠性，本课题采用的图像序列算法具有较高的准确性。基于锁相的红外无损检测技术对于碳纤维复合材料机翼缺陷的可视化与定量化研究具有较高的可行性。

关键词：碳纤维机翼；锁相红外无损检测；有限元分析；图像序列处理；定量化分析

Abstract

As the main material for aircraft airfoils, carbon fiber reinforced plastic (CFRP) may produce some defects which includes delamination and debonding due to the difference of the materials and control of process factors. At present, the research on traditional non-destructive testing (NDT) is relatively lagging, which affects the continued development of CFRP in the aviation field. Compared with the traditional NDT method, lock-in infrared non-destructive testing has some advantages, it not only can't contact the samples, but also has high efficiency. Therefore, infrared non-destructive testing has become the best choice for the NDT of airfoil defects in this paper.

In view of the current situation which in the quantitative research of CFRP airfoild efects, this research takes the CFRP which contains bulit-in Teflon as the object. In order to determine the heat source loading parameters of the NDT system, a three-dimensional thermal conduction model was constructed and the specimen is loaded with sinusoidal periodic excitation. Through the simulation results, this research analyzes the distribution of surface temperature field in the specimen defective area and sound area under different conditions of defect size, defect depth, heat source loading frequency and material properties. On this basis, the influence of defect size and depth on the optimal detection frequency and the best detection time is studied. These provides a valuable reference for subsequent experiments. Based on the above research, this paper completes the lock-in infrared NDT platform and optimizes the parameters of the infrared camera. After comprehensive evaluation of various filtering methods, the Gaussian filter is used to preprocess the infrared thermal wave image sequence. The defect features information of specimen is extracted by three image sequence algorithms which includes multi-frame accumulation average and difference method, fast Fourier transformation method and principal component analysis method. According to the results of infrared thermal wave image sequence processing, this research realizes the visualization of defects by image post-processing methods, such as image segmentation, phase shift method and grayscale 3D reconstruction. After calibration of the infrared camera, the numerical analysis methods such as extreme value and derivative are used to determine the position and size of the defects. Ultrasonic C-scanning is used to assist in verifying the accuracy of the results and analyze the causes of the errors. Then the quantitative research of the defects is finally realized.

In order to verify the research results, the experiments of CFRP samples with built-in Teflon defects and flat-bottom defects are carried out at the end of this research. Based on the infrared thermal wave image sequence processing, the visualization and quantitative estimation analysis of the defects are completed. These experiments achieve good results and they show that the infrared NDT platform has high reliability, and the image sequence algorithm adopts in this research has high accuracy. The infrared NDT technology based on lock-in technology has a good effect on the visualization and quantification of defects in CFRP airfoil.

Keywords: CFRP airfoil, lock-in infrared NDT, finite element analysis, image sequence processing, quantitative analysis

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题来源	1
1.2 课题研究背景和意义	1
1.3 国内外研究现状	2
1.3.1 无损检测研究现状	2
1.3.2 碳纤维机翼缺陷研究现状	4
1.4 本文的主要研究内容	6
第 2 章 碳纤维机翼的热力学仿真分析	8
2.1 引言	8
2.2 碳纤维机翼的锁相红外模型建立	8
2.2.1 碳纤维复合材料机翼模型建立	8
2.2.2 锁相红外热源加载系数确定	10
2.3 机翼缺陷仿真结果分析	12
2.3.1 表面温度场分析	12
2.3.2 最佳检测频率分析	15
2.3.3 最佳检测时间分析	16
2.4 本章小结	17
第 3 章 锁相红外图像序列算法研究	18
3.1 引言	18
3.2 红外相机校正与补偿	18
3.2.1 非均匀校正	18
3.2.2 无效像元补偿	19
3.3 图像预处理	20
3.3.1 锁相红外无损检测影响因素分析	20
3.3.2 图像预处理算法及评价研究	21
3.4 图像序列处理算法	24
3.4.1 多帧累加平均与差分法	25
3.4.2 快速傅里叶变换法	26

3.4.3 主成分分析法	27
3.4.4 图像序列算法评价研究	28
3.5 本章小结	29
第 4 章 机翼缺陷的可视化与定量化研究	31
4.1 引言	31
4.2 机翼缺陷的可视化研究	31
4.2.1 基于边缘检测的图像分割	31
4.2.2 基于阈值的图像分割	33
4.2.3 基于分水岭的图像分割	34
4.2.4 机翼缺陷三维显示技术	35
4.3 缺陷位置及尺寸的定量化研究	36
4.3.1 像素当量标定	37
4.3.2 基于极值的缺陷位置估计	37
4.3.3 基于导数的缺陷尺寸估计	38
4.3.4 缺陷尺寸验证及误差分析	39
4.4 本章小结	40
第 5 章 碳纤维机翼试件缺陷的实验分析	41
5.1 引言	41
5.2 锁相红外无损检测系统搭建	41
5.2.1 硬件系统搭建	41
5.2.2 软件系统搭建	43
5.3 内置缺陷的碳纤维机翼实验	44
5.3.1 实验样本制备	44
5.3.2 红外图像序列处理	45
5.3.3 实验结果分析	47
5.4 含平底孔缺陷的碳纤维机翼实验	48
5.4.1 实验样本制备	48
5.4.2 红外图像序列处理	49
5.4.3 实验结果分析	50
5.5 本章小结	52
结 论	54
参考文献	56
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果	61

哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限	62
致 谢.....	63

第 1 章 绪 论

1.1 课题来源

本课题来源于珠海市某航空企业“机翼缺陷检测”项目，课题名称“碳纤维机翼缺陷的锁相红外无损检测研究”。

1.2 课题研究背景和意义

在航空领域中，先进复合材料除了可以降低重量外，同时还可以提高飞行器的可靠性^[1]。复合材料往往会通过物理或化学方法集合几种不同材料的优良特性，以满足具体的产品需求。碳纤维复合材料就是一种含碳量在 90% 以上的新型复合材料，它除了重量轻的优点外，还具有较高的强度，同时对温度具有较高的耐受力。近些年，碳纤维复合材料在航空宇航^[2,3]、电气^[4,5]、建筑^[6]以及汽车工程^[7]等领域的应用日益广泛。

自 1970 年以来，复合材料在民用客机上的比例一直在迅速增长，B787 和 A350 的复合材料比例就一直在 50% 左右^[8]。图 1-1 显示了波音 787 机身材料的构成比例示意图，可以看出，碳纤维是波音 787 机翼的主要材料。碳纤维复合材料的成型方式有很多，但因为层压成型质量最为稳定、生产效率最高，因此被广泛应用于碳纤维复合材料的批量生产中。但由于层压成型的工艺限制，碳纤维复合材料在制造过程很可能会形成一些以分层、脱粘为代表的缺陷，而且以上缺陷也会伴随着使用过程产生。这些缺陷会严重降低碳纤维复合材料的性能，并可能导致灾难性后果。在这些缺陷类型中，最为常见的缺陷类型即是分层（复合材料层与层之间的分离）。

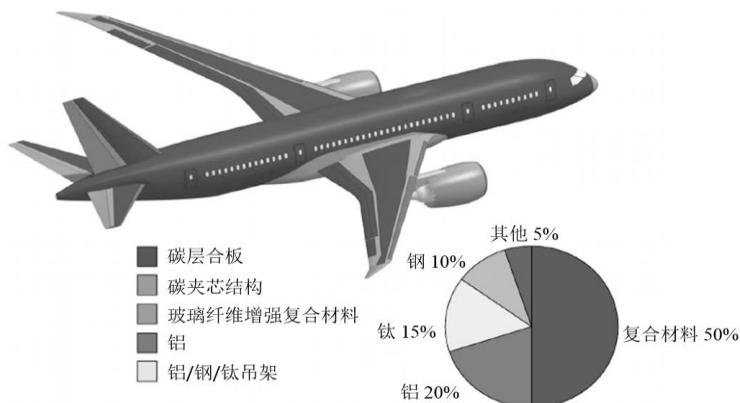


图1-1 波音 787 机身材料示意图^[9]

由于上述缺陷均埋藏于机翼内部，传统的目视法、可见光图像处理均达不到检测要求。为保证产品正常使用，人们对无损检测技术的需求也开始变得迫切起来。顾名思义，无损检测要求在可检测缺陷的同时还必须保证不能对材料造成损伤。目前传统的无损检测主要有以下几种：超声检测的检测精度较高，但是需要逐点扫描，因此检测效率较低；X 射线检测适用于体积型缺陷，但对平面缺陷探测效果有限，且 X 射线对人体有害；磁粉检测主要适用于检测离表面较近的缺陷，对较深的缺陷效果则不明显；涡流检测对材料性质要求较高，非金属材料必须能产生涡流才能被检测，且检测时影响因素较多，不利于缺陷定量化估计；渗透检测不受样本成分及结构限制，但是只能对表面开口缺陷进行检测。

在此背景下，多学科领域交叉应用的红外无损检测作为一门新兴技术开始被广泛运用到各行各业之中。相对于上述无损检测方式，红外无损检测技术不仅快速高效，而且检测面积大、适用范围广。另外，通过后期的红外图像序列处理，红外无损检测不仅可以实现可视化效果，还可以通过人工标定的方式完成对缺陷的定量化分析。基于以上特点，红外热成像技术成为本课题进行碳纤维机翼缺陷无损检测研究的不二选择。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 无损检测研究现状

尽管各种无损检测方法分别依靠声、光、电、磁等手段对缺陷进行检测，原理各异，但是其本质是相同的：在不破坏样本内部组织、保证其正常使用的前提下，对样本施以适当激励，根据缺陷区域异于正常区域的变化情况，提取相应特征，完成对缺陷类型、位置、尺寸等各方面特征的定性或定量评估。下文将主要介绍目前在复合材料缺陷检测上应用较多的超声检测、X 射线检测、涡流检测以及红外无损检测四种方式的研究现状。

1.3.1.1 常规无损检测

(1) **超声无损检测** 超声无损检测是目前较为成熟、应用最为广泛的一种无损检测方式，主要分为 A 扫描、B 扫描以及 C 扫描三种扫描检测方式。英国 Smith R A 等学者通过背散射信号分析法对材料缺陷进行了有效评估^[10]，效果图如图 1-2 a)所示。北京航空航天大学的周正干等学者则分析了基于红外热成像以及喷水、相控阵、空气耦合、激光超声技术的最新应用^[11]。北京航空材料研究院的王铮等学者则分析了基于两种不同超声基准波的缺陷评定方

法在实际检测中的差异情况^[12]。

(2) **X 射线无损检测** X 射线无损检测的基本原理是根据样本对射线的吸收以及散射作用的不同,进而形成灰度值不同的影像,以此来提取缺陷特征。受限于技术原因,从 1895 年 X 射线被发现到 CT 扫描仪被发明,中间的近八十年间,基于 X 射线的无损检测技术都没有得到广泛使用^[13]。目前,射线无损检测技术在电力系统^[14]以及农林业^[15]方面发挥了重要作用,射线扫描的效果图如图 1-2 b)所示。对于复合材料,X 射线目前主要用来检测其中的夹杂、孔隙、密度不均匀等体积型缺陷^[16]。

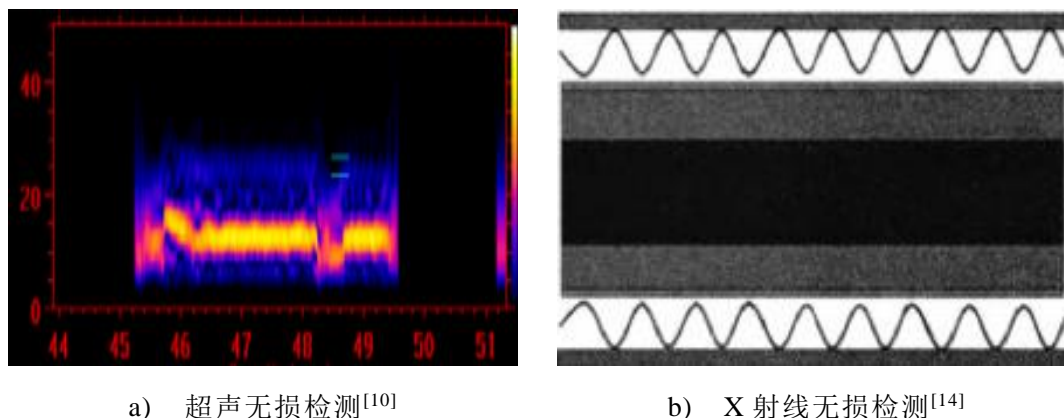


图1-2 常规无损检测效果图

(3) **涡流无损检测** 涡流无损检测的原理是通过对线圈通入电压产生磁场,通过合适的方法提取由涡流场产生的二次电磁场特征,进而分析缺陷信息^[17]。我国的梁涛等学者采用小波变换结合主成分分析的多分辨率统计分析方法,对冲击损伤的缺陷特征进行了有效研究^[18]。此外,张荣华等人以空间分布熵为载体展开了基于电磁脉冲的涡流检测研究^[19]。周德强等学者则对碳纤维复合材料进行了涡流无损检测仿真与实验研究^[20]。

1.3.1.2 红外无损检测

(1) **国外研究现状** 随着科学技术的日益进步,红外无损检测凭借其诸多优点开始逐渐成为复合材料无损检测的重要手段。从 19 世纪 60 年代开始,外国科学家们就逐渐建立起了完整的红外辐射理论。在 20 世纪 30 年代,红外无损检测的思想开始萌芽,三十年后,Green 和 Alzofon 的工作真正使红外无损检测成为世界各国研究者关注的对象。受检测成本以及技术瓶颈的制约,新兴的技术往往首先被应用在军事领域。美国军方率先加大了对红外技术的投入,美军多部门以及航空航天局等诸多单位均取得了显著成果。随后,与军方关系密切的军火供应商也纷纷将此技术应用到自己的产品上^[21]。最终,随着政府的扶持与推广,红外无损检测逐渐走向民用,被广泛使用在各行各业之中。

1990 年以来,随着科技革命日新月异的发展,作为红外无损检测核心设备的红外相机的制造技术水平不断提高。高精度、高采集速率的红外相机不断问世,对该项技术的发展起了极大的促进作用。此外,各国研究者不断推出的红外无损检测及评价算法也在客观上加速了这项技术的应用步伐。进入 21 世纪以来,各国学者应用红外热成像技术针对复合材料在航空航天领域的应用展开了广泛的研究。2009 年, Mabrouki F 等学者对铝-碳纤维-铝这种特殊结构的材料进行了缺陷检测,并对能量加载与缺陷尺寸以及深度之间的关系进行了研究^[22]。Fernando L 等学者提出了一种基于三维瞬态热传导方程的非均匀介质热力学数学模型,用于模拟复合介质在其表面施加热脉冲时的热响应^[23]。2013 年, Usamentiaga R 等学者提出了一种使用有源热成像技术自动检测碳纤维复合材料冲击损伤的方法^[24]。同年, Grys S 等学者分析了在一定深度下具有次表面缺陷的均匀材料中热现象的三维数值模拟结果^[25]。Waugh R C 等学者创建了脉冲热成像 (PT) 和脉冲相位热成像 (PPT) 的瞬态热有限元模型,并使用铝、碳纤维复合材料和粘接接头等材料进行了验证^[26]。Munoz V 等学者用声发射和红外热成像分别记录声信号和温度变化,并综合判定碳纤维复合材料的缺陷^[27]。Toscano C 等学者也利用红外热成像和相控阵超声波来检测被冲击损坏的碳纤维增强复合材料^[28]。在图像算法方面, Florez-Ospina J F 等学者创新性地提出了全局信噪比的概念用来全面评估红外图像算法检测能力^[29]。

(2) 国内研究现状 红外无损检测从 20 世纪末开始被我国学者关注。王祥林学者的团队较早进行了对红外无损检测的研究,并在刀具^[30]、复合材料^[31]等领域的应用上取得了一定成果。2003 年,随着我国第一个红外无损检测联合实验室建立,我国的红外无损技术进入到一个新层次。进入到本世纪以来,国内的诸多大学及学者对该项技术展开了严谨细致的研究。首都师范大学的张存林教授团队在缺陷数值模拟^[32]、蜂窝材料检测^[33]以及红外图像增强^[34]等方面均取得良好成果。大连理工大学的郭杏林教授团队则在复合材料的疲劳损伤^[35,36]、管道无损检测^[37]等领域展开了研究。近些年来,李银等学者针对碳纤维复合材料的低速冲击损伤利用数值模拟等方法展开了卓有成效的研究^[38]。解放军的吕事桂等学者在共轭梯度算法的基础上利用 Ansys 完成了对材料内壁缺陷的定量识别^[39]。电子科大的冯琪智等人提出了基于区域生长和热成像信息重构的融合算法,该算法能显著提高缺陷和非缺陷区域的对比度^[40]。

1.3.2 碳纤维机翼缺陷研究现状

目前通过锁相红外热成像技术对碳纤维复合材料缺陷进行的无损检测主

要分为两个研究方向：一种是通过图像序列算法增强样本缺陷特征，提高可视化效果；另一种则是对缺陷位置、尺寸等特征进行定量化估计。下面分别对这两个研究方向的现状进行阐述。

(1) 可视化研究 最初的可视化研究为了降低难度，通常通过在复合材料样本背面制造平底孔来模拟缺陷。例如，哈尔滨工业大学的刘俊岩等学者就通过锁相红外技术，利用四点相关法以及时间常数法等方法来增强缺陷特征，图 1-3 显示了样本缺陷示意图及算法处理效果图^[41]。同时期，北京大学的学者^[42]以及国外的 Meola C^[43]等学者对机翼的冲击损伤也展开了相应的研究。随着红外技术的日益发展，各国研究学者纷纷通过在碳纤维中内置聚四氟乙烯薄膜来模拟缺陷，以求更逼真的模拟并检测机翼缺陷。台湾清华大学的学者分别将形态学处理^[44]以及惩罚最小二乘法^[45]等方法扩展到 CFRP 结构中的缺陷检测中，显著增强了红外图像缺陷区域特征，增强效果如图 1-4 所示。Yousefi B 等学者利用内置缺陷做了类似研究^[46]。尽管这些方法有效突出了缺陷特征，但仍未完成缺陷定量化估计。

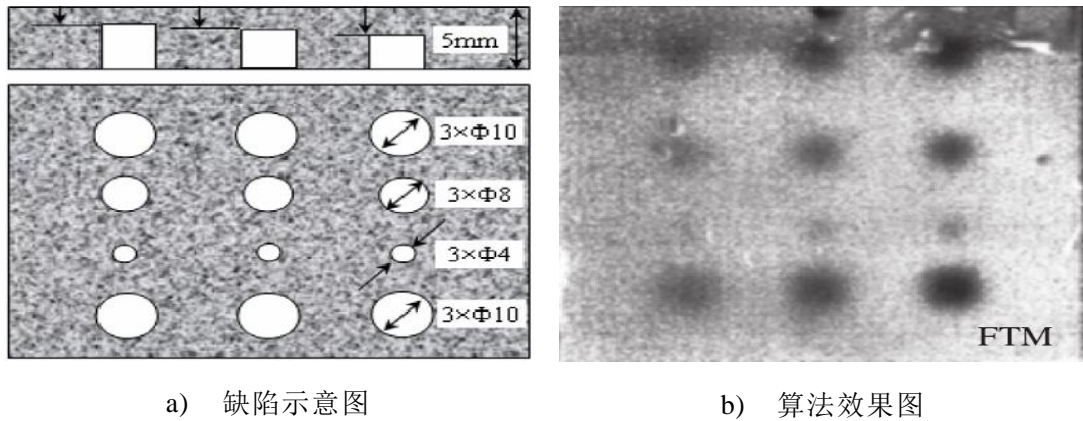


图1-3 平底洞样本示意图及算法效果图^[41]

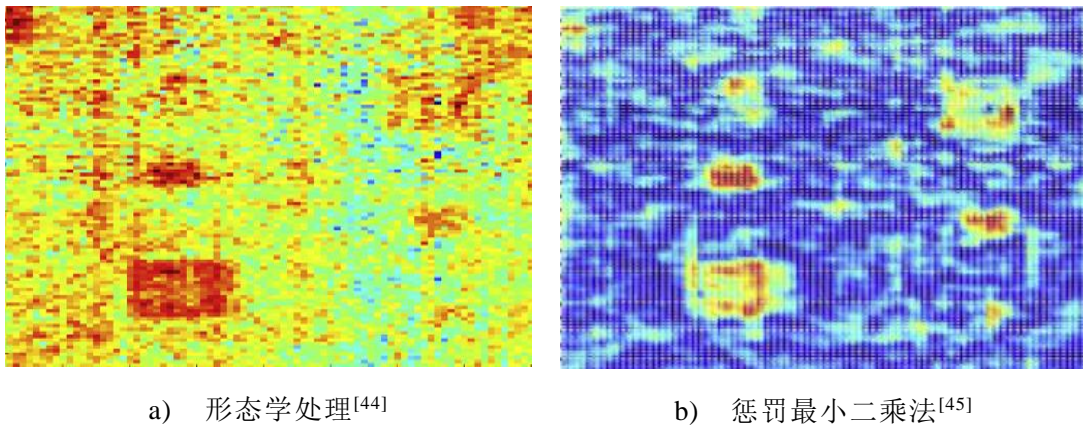


图1-4 内置缺陷样本检测图

(2) 定量化估计 定量化估计一直是复合材料缺陷的难点所在，可视化研究是定量化估计的基础。没有有效的算法提取缺陷特征信息，缺陷的定量化估计也就无从谈起。目前的缺陷定量化估计还是以在碳纤维复合材料样本背面制造平底孔模拟缺陷为主。Montanini R 学者就利用平底孔缺陷对缺陷深度进行了研究^[47]。Huebner S 等学者在平底孔缺陷的基础上利用概率方法间接完成了缺陷尺寸的定量化估计^[48]，实验效果如图 1-5 所示。Usamentiaga R 等学者利用蜂窝材料背后钻孔的方式，完成了缺陷中心的定量化估计^[49]，实验如图 1-6 所示。尽管以上学者通过样本背后钻孔的方式完成了缺陷的定量化估计，但误差较大，且不能较好模拟复合材料内部缺陷的真实情况。

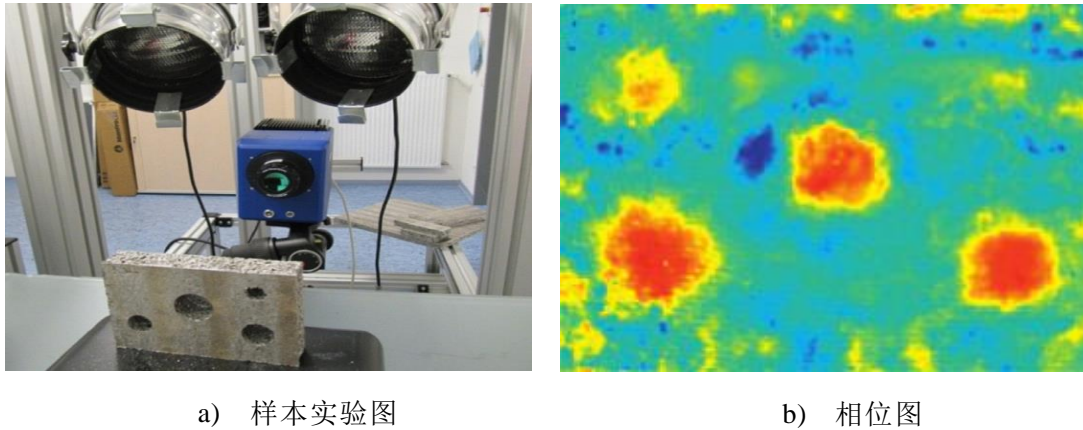


图1-5 基于锁相法间接定量估计缺陷尺寸^[48]

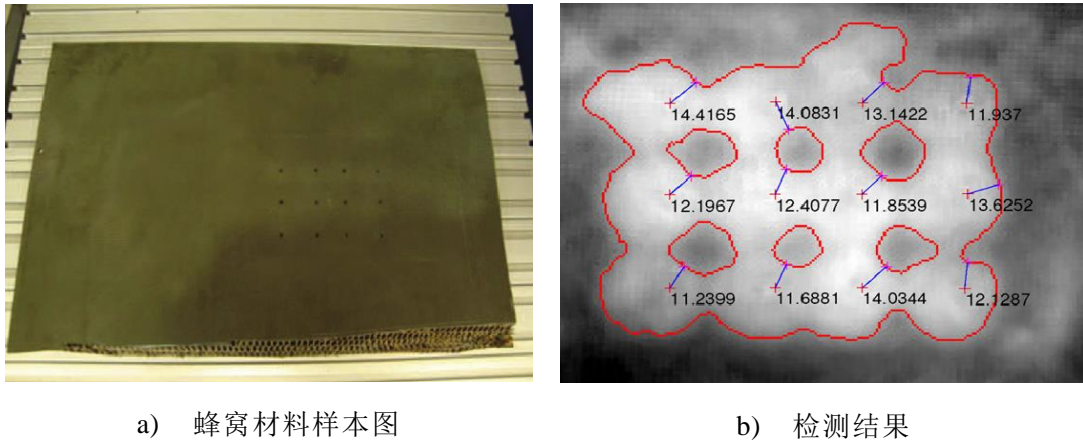


图1-6 蜂窝材料定量估计缺陷中心^[49]

1.4 本文的主要研究内容

目前红外无损检测中涉及的导热问题大致分为正问题和反问题两类。导热正问题一般应用在初始研究阶段，它的目的是研究不同缺陷在各种已知热力学

条件下的表面温度场变化规律，以便为后续的缺陷评估提供参考依据。导热反问题是指在导热正问题研究的基础上，对样本加载合适的热源激励，通过研究样本表面温度场分布情况判断样本缺陷的类型、位置以及尺寸等特征信息。

针对目前碳纤维复合材料机翼缺陷可视化与定量化研究中存在的问题，本课题将以内置聚四氟乙烯薄膜的碳纤维机翼作为研究对象，遵循上述导热问题的思路，先通过导热正问题研究分层缺陷在规定热源激励条件下的温度场分布特征，继而在此基础上利用导热正问题的规律，通过研究分析机翼样本表面的温度场分布数据，完成对各种样本内部缺陷的有无、位置、尺寸等特征信息判定，最终完成导热反问题的求解。本课题的具体研究内容如下：

（1）完成碳纤维机翼三维模型建立及热力学仿真分析。对机翼内部分层缺陷进行仿真分析研究，在已知热源激励加载参数及初始边界条件的前提下，分析内部缺陷引起的样本表面温度场变化规律，建立样本温度场分布模型；探求不同尺寸、深度的缺陷对温度场分布、最佳检测频率的影响，并对最佳检测时间进行研究。

（2）完成锁相红外无损检测系统搭建。搭建实验所需的硬件实验平台，并完成相关软件系统的开发。根据仿真结果初步确定激励热源加载方式、加载频率和加载时间等参数，并通过后续实验不断更新、优化。

（3）完成红外图像序列处理。采集碳纤维机翼样本表面温度分布的红外图像序列，并通过合适的红外图像序列处理算法（包括图像预处理、处理），提取缺陷特征，清晰展现样本缺陷信息。

（4）完成缺陷可视化及定量化研究。在红外图像序列处理的基础上，应用图像分割等后处理手段完成缺陷可视化研究，应用基于极值、导数的数值分析方法完成对缺陷位置、尺寸的定量化估计。

（5）完成锁相红外无损检测系统可靠性验证。在以上工作内容的基础上，通过多种类型的机翼缺陷样本判定实验平台可靠性以及红外图像序列处理算法的准确性，最终完成锁相红外热成像技术在碳纤维机翼缺陷无损检测中可行性的验证。

第 2 章 碳纤维机翼的热力学仿真分析

2.1 引言

在热力学系统设计阶段，为了方便、经济高效地修改模型，寻求最优参数，人们常常要利用计算机在仿真模型上进行多次实验。其实，计算机模拟仿真也是实验的一种，而且它可以随时动态、精准地显示样本变化趋势。从某一角度上来讲，这比实验对问题的认识更为深刻、更为细致。另外，计算机模拟仿真与实验之间也可以相互指导、相互印证，从而增强结果的准确性。

本章将在依据热力学基本定律的前提下，完成碳纤维复合材料机翼的三维模型建立以及锁相红外热源加载参数确定等工作，继而对机翼缺陷完成仿真分析研究，构建温度场模型，探究各种因素对样本表面温度变化的影响情况；在趋势项消除的基础上完成对最佳检测频率及最佳检测时间的分析，为后续机翼的锁相红外无损检测实验提供理论支持。

2.2 碳纤维机翼的锁相红外模型建立

2.2.1 碳纤维复合材料机翼模型建立

由于缺陷的形成原因各异，内部结构特征也不尽相同，因此其热传导系数也并不固定。一般来说，热传导系数小于材料本身的缺陷被称为隔热性缺陷；反之，则称为导热性缺陷。对于本课题研究的碳纤维复合材料机翼，脱粘、分层等缺陷均属于隔热性缺陷，蜂窝复合材料中的积水缺陷则属于导热性缺陷，其具体示意图如图 2-1 所示。

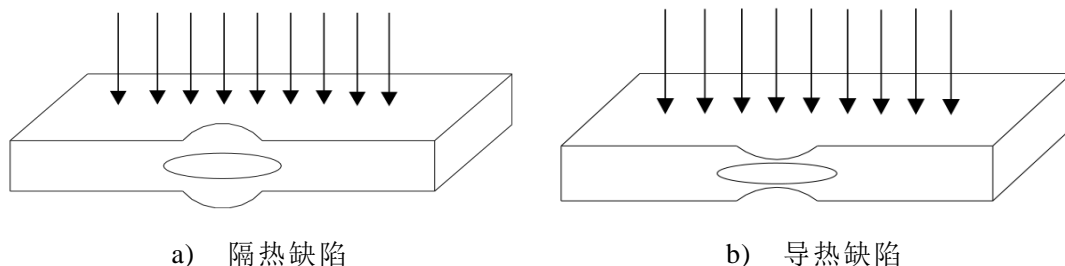


图2-1 隔热及导热缺陷检测示意图

图 2-2 a) 显示了实验样本的实际尺寸，该样本长度为 250 mm，宽度为 200 mm，厚度为 1.26 mm。图 2-2 b) 显示了样本中缺陷的具体位置。图 2-3

则为碳纤维机翼在显微镜下的金相图。可以看出，样本是由碳纤维织物以 0° 和 90° 两种相互垂直的方式铺叠而成。根据统计，碳纤维板单层平均厚度为 0.18 mm。

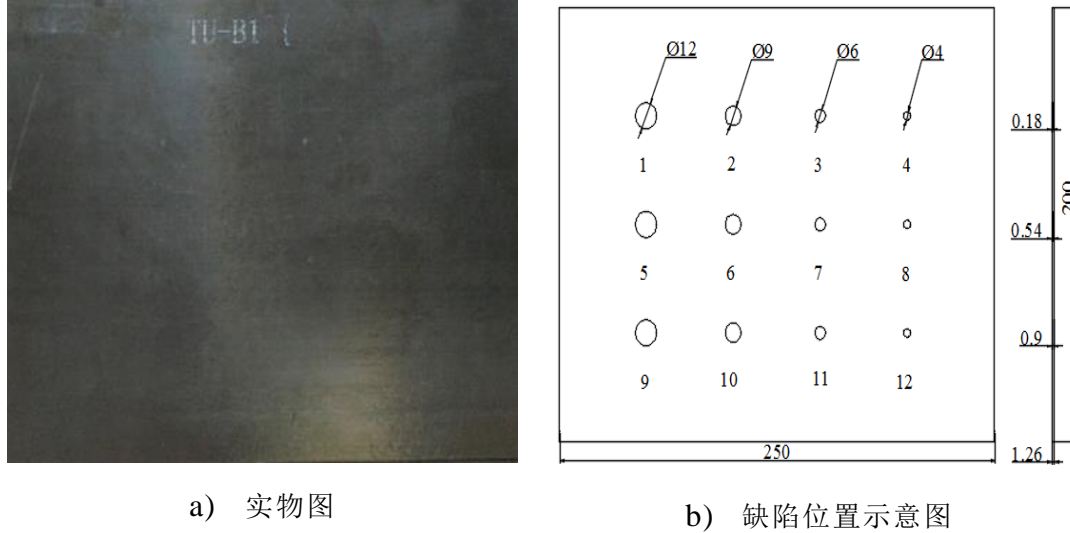


图2-2 实验样本

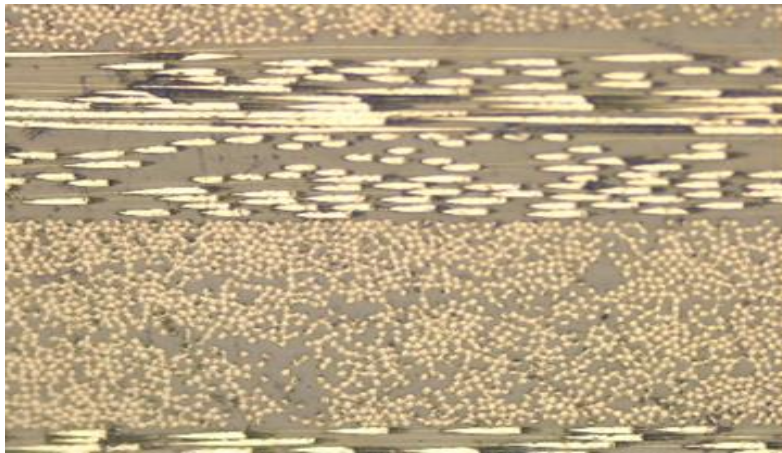


图2-3 碳纤维机翼金相图

对于本课题重点研究的碳纤维复合材料分层缺陷，在制备过程中很难在保证尺寸的前提下制造出带有空气间隙的样本。聚四氟乙烯化学性质稳定，热传导率与空气均低于碳纤维材料。另外，它不易与样本粘连，缺陷制作过程简单方便，并且多项研究表明其模拟分层缺陷的可靠性与等效性^[50]。因此样本分别在第2层、第4层、第6层（深度分别为 0.18 mm、0.54 mm、0.9 mm）预埋了 4 个双层聚四氟乙烯薄膜（Teflon，单层薄膜厚 0.05 mm）来模拟分层缺陷，缺陷直径分别为 12 mm、9 mm、6 mm、4 mm。表 2-1 为碳纤维复合材料和聚四氟乙烯的热特性参数。

表 2-1 碳纤维复合材料与聚四氟乙烯热力学特性

	碳纤维复合材料	聚四氟乙烯
密度 ($kg \cdot m^{-3}$)	1652	1100
比热容 ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	1411	2150
热传导率($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	K_x 8.74	0.209
	K_y 0.61	
	K_z 0.62	

2.2.2 锁相红外热源加载系数确定

根据是否利用外部热源这一标准，红外无损检测可分为主动和被动热成像两种。考虑到在进行缺陷检测时，需要使样本缺陷与周围无损区域之间产生热对比，因此本课题将采用主动热成像技术。

根据激励热源的加载方式差异，主动红外检测主要分为脉冲以及锁相热成像技术两种，具体示意图如图 2-4 所示。锁相红外热成像与脉冲红外热成像不同，它是指对样本施加周期性的正弦激励热流，通过红外相机采集相关热波图像序列，以此记录样本各点表面温度的变化情况，继而通过后续的图像序列处理算法提取图像中各点的幅值和相位特征信息，从而达到缺陷可视化与量化评估的目的^[51]。

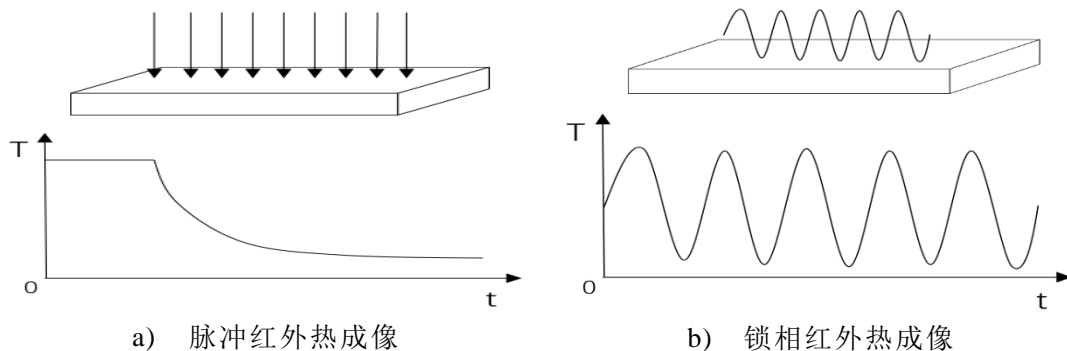


图2-4 红外无损检测技术示意图

目前，锁相红外热成像技术已经成为复合材料无损检测的主流方式。锁相红外热成像技术有两种激励热源可以选择。若用卤素灯等光源进行热激励，则被称为光热锁相热成像；若使用高频弹性波进行激励，则被称为超声锁相热成像^[52]。本课题最终选取了光热锁相热成像的激励方式，通过函数发生器以及功率放大器等设备调制卤素灯的热量输出，以此周期性的在样本中堆积热量。

在主动红外的无损检测中，加热能量、加热频率以及加热时间等诸多因

素难以综合控制，而且对于不同属性的检测样本，这些变量之间没有明确的变化规律，其准确取值只能依靠设定初始值，然后用实验不断逼近，因此加热过程的控制一直是红外无损检测的难题所在。

本课题将遵循热力学第一定律对碳纤维机翼展开研究，并主要考虑以下两种传递方式。热传导是指热量从高温的物体表面向其低温的内部进行传导的方式。热传导方程如式(2-1)所示：

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2-1)$$

式中 q'' —— 热流密度；
 k —— 导热系数。

热对流是指由于温度差异原因，热量在固体与流体之间进行交换的过程。热对流方程如式(2-2)所示：

$$q'' = h(T_s - T_B) \quad (2-2)$$

式中 h —— 对流系数；
 T_s —— 固体温度；
 T_B —— 空气温度。

热交换是一个比较复杂的过程，我们往往采用微分方程来描述材料与热流加载之间的关系。三维导热方程如式(2-3)所示：

$$\frac{\partial T}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial T}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial T}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \varphi = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-3)$$

式中 ρ —— 材料密度；
 c —— 材料比热容；
 φ —— 均匀内热源生热率；
 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ —— 样本在 x, y, z 三个方向上的热传导系数。

若对于各向同性材料，仅考虑 z 方向传热，且样本本身不产生热量时，上式可简化为一维微分方程，如式(2-4)所示：

$$\frac{\partial T}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-4)$$

因为碳纤维复合材料导热系数较小，热平衡相对较慢，达到稳态的时间较长，所以本课题采用了瞬态分析方法。这样既可以节省检测时间，又可避免温度过高对样本造成损伤。考虑到无法对样本施加负能量热源，因此本课题采用了对热流密度增加一个常量，并在后续计算中消除的方法。热流密度加载方程如式(2-5)所示：

$$Q = 1000 \times (1 + \sin(2 \times \pi \times f \times t)) \quad (2-5)$$

2.3 机翼缺陷仿真结果分析

2.3.1 表面温度场分析

图 2-5 a) 显示了在上述热流密度加载条件下, 样本某一缺陷 (直径为 12 mm, 深度为 0.18 mm) 表面温度与时间的关系图, 而图 2-5 b) 则显示了在实验中该位置对应的灰度值 (温度越高, 红外相机的成像区域灰度值越大) 随时间变化的曲线图。对比两幅图像可以发现: 两者的温度上升趋势总体一致。

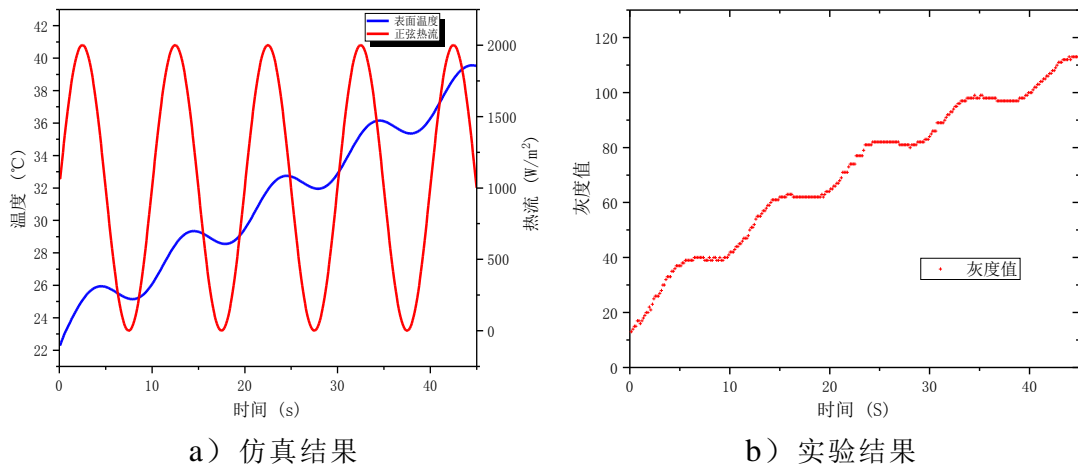


图2-5 仿真结果与实验结果对比

但是, 仿真结果与实验结果还有两点不同的地方: 第一, 实验中得到的温度曲线并不平滑, 存在着许多毛刺; 第二, 可以看到, 实验得到的温度曲线在后期趋于平衡, 而仿真得到的温度曲线仍然在缓慢提升。造成这两个问题的原因是多方面的, 如环境因素影响、相机采集存在误差等等, 但是两者的结果吻合度很高, 达到了相互印证的目的。

图 2-6 显示的六幅图像均为单面检测时样本表面的温升曲线。其中, 图 2-6 a) 为无损区域温度随时间变化图, 图 2-6 b) 为标准对照条件 (样本为碳纤维复合材料, 直径为 12 mm、深度为 0.18 mm 的聚四氟乙烯缺陷, 热流密度加载频率为 0.1 HZ) 下的温升曲线。其余四幅图片则分别显示了与标准条件相比, 只改变单一变量得到的结果。通过观察, 我们可得到以下结论:

(1) 缺陷尺寸与缺陷深度均直接影响了样本表面温度。缺陷尺寸越大, 深度越浅, 那么对于分层这种隔热性缺陷, 它的表面温度越高。在图 2-6 c) 和图 2-6 d) 的温升曲线上, 在 60 s 这个时间点, 其温度均低于标准对照下的温度, 且深度为 0.9 mm 的缺陷表面温度已接近于无损区域温度。上述现象说

明相对于尺寸，样本温度场分布对缺陷深度更加敏感。

(2) 温度随时间的变化周期与热源加载频率密切相关。图 2-6 e) 显示的是热流密度加载频率为 0.05 HZ 时的温度变化曲线，它的周期明显要长于 0.1 HZ 加载频率下的周期，并约等于其两倍。

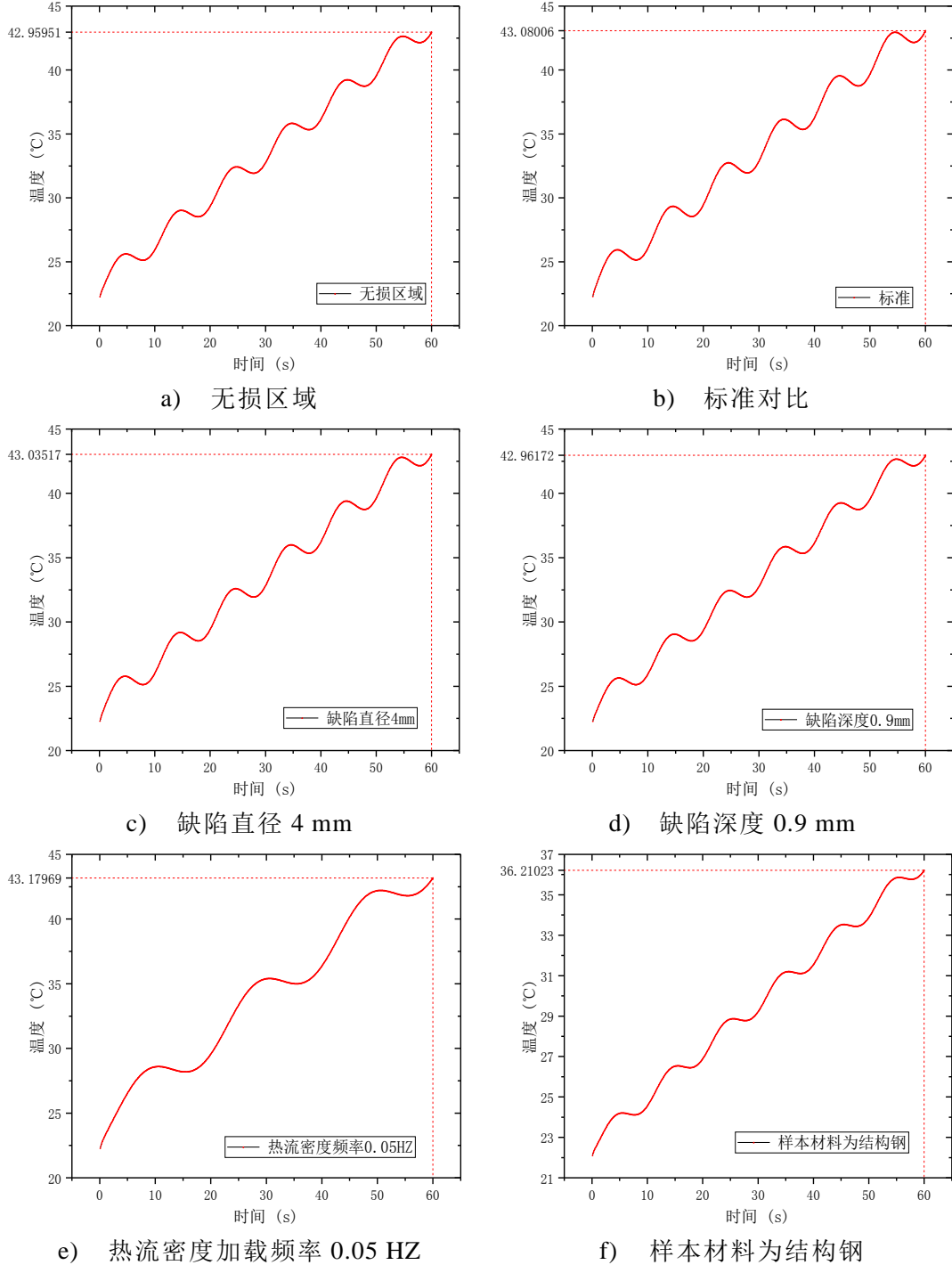


图2-6 改变单一变量的仿真结果

(3) 材料属性也极大影响着表面温度变化趋势。材料不同，相应的密度、

比热容、热导率也会不同，人们将这些材料属性统一用热扩散系数来表示，具体关系如式(2-6)所示。由于钢的热扩散系数要大于复合材料，因此与空气的热交换更为剧烈，所以它的温度上升较为平缓，在 60 s 的时间点，温度大约只有 36 摄氏度。

$$\alpha = \lambda / \rho c \quad (2-6)$$

式中 α —— 热扩散系数；

λ —— 热导率；

ρ —— 材料密度；

c —— 材料比热容。

观察图 2-6 中 6 幅图像的表面温升曲线，可以清楚看出：在瞬态时，温升曲线以一个正弦曲线与一个趋势项的叠加形式表现。因此，为准确提取样本缺陷区域与正常区域的相位差，消除趋势项，获得近似正弦变化的温度曲线是非常必要的。本课题将基于最小二乘法完成对趋势项的消除。具体方法是：在对曲线进行拟合后，将所得结果与原始结果相减，最终获得正弦曲线。式(2-7)、(2-8)以及(2-9)为最小二乘法的一阶拟合公式，式(2-10)则显示了最小二乘法的多阶拟合公式，其值可根据克莱姆法则计算得出。为方便描述，若将式(2-10)简化成式(2-11)的形式，那么其唯一解如式(2-12)所示。

$$y = a + bx \quad (2-7)$$

$$a = \frac{\sum y_i}{n} - b \times \frac{\sum x_i}{n} \quad (2-8)$$

$$b = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-9)$$

$$\begin{pmatrix} N & \sum x_i & \cdots & \sum x_i^n \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \cdots & \sum x_i^{n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_i^n & \sum x_i^{n+1} & \cdots & \sum x_i^{2n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \vdots \\ \sum x_i^n y_i \end{pmatrix} \quad (2-10)$$

$$XA = Y \quad (2-11)$$

$$A = X^{-1}Y \quad (2-12)$$

式中 x_i —— 数据点横坐标；

y_i —— 数据点纵坐标；

n —— 要拟合的数据点个数；

X^{-1} —— 矩阵 X 的逆。

采用上述方法对样本表面温升曲线分别进行一、二、三阶消除后，得到

的效果如图 2-7 所示。结果表明：利用最小二乘法二阶曲线拟合消除趋势项效果较好。在用最小二乘法进行趋势项消除时，拟合阶数与消除效果并不是正相关的关系。因此，不必盲目追求高阶拟合消除。

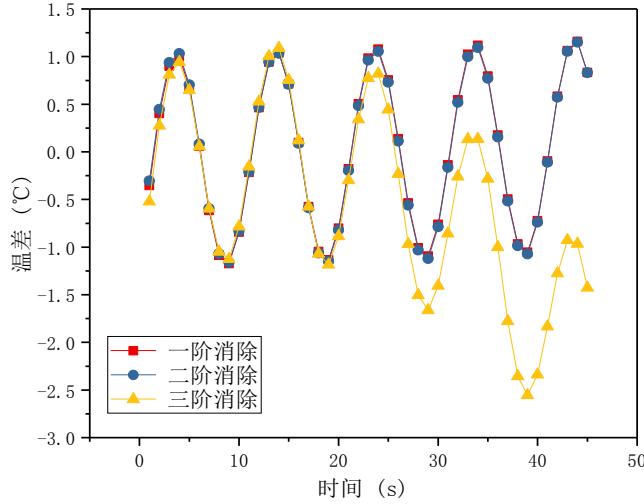


图2-7 趋势项消除对比

2.3.2 最佳检测频率分析

本课题以相位差作为对最佳检测频率的判断标准。相位差指的是在正弦热源激励下，有损区域与无损区域的相位之差，具体关系如式(2-13)所示。研究中以缺陷中心点的相位值作为有损缺陷的相位值，以缺陷周边区域相位值作为无损区域相位值。

$$\Delta\varphi = \varphi_d - \varphi_h \quad (2-13)$$

式中 φ_d —— 缺陷区域相位；
 φ_h —— 无损区域相位。

图 2-8 a) 显示了在同一深度下不同直径缺陷在不同频率热源激励下的相位差趋势。可以看出，不同直径缺陷的相位差变化趋势一致，且最大相位差均出现在同一激励频率附近。而且，缺陷直径越小，相位差的变化趋势越平缓，最大相位差也越小。图 2-8 b) 显示了在同一直径（12 mm）下不同深度缺陷在不同频率热源激励下的相位差趋势。观察可得：随着机翼样本缺陷深度的加大，相位差的变化却越来越小，深度为 0.9 mm 的缺陷对激励频率变化敏感度很小。另外，最大相位差的激励频率也在随着缺陷深度增加而减小。通过仿真结果，我们可以得出如下结论：

（1）缺陷尺寸越大，深度越浅，红外无损检测的灵敏度越高，缺陷也越容易被检测到。

(2) 相位差对于缺陷尺寸的敏感度较小, 在同一缺陷深度下, 最佳检测频率基本一致; 而在缺陷尺寸固定的情况下, 随着缺陷深度的增加, 最佳检测频率的值也在减小。因此, 较低的热源激励频率有助于探测碳纤维机翼更深的缺陷。

(3) 随着缺陷深度增加, 缺陷对于热源加载频率将不再敏感, 红外无损检测的效果将会变差。

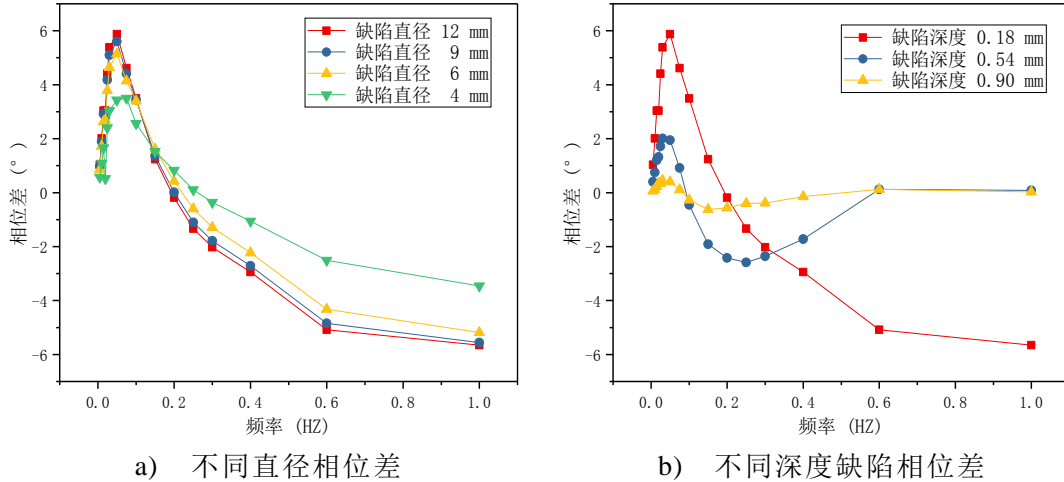


图2-8 不同直径、深度缺陷相位差对比

2.3.3 最佳检测时间分析

本课题以最大温差作为对最佳检测时间的判断标准。温差指的是有损与无损区域的温度之差, 具体关系如式(2-14)所示。研究中分别采用缺陷中心点的温度值与其周边区域温度作为有损区域以及无损区域的温度值。

$$\Delta T = T_d - T_h \quad (2-14)$$

式中 T_d —— 缺陷区域温度值;

T_h —— 无损区域温度值。

图 2-9 a) 显示了在同一深度、同一热流密度加载频率下不同直径缺陷的温差随时间变化趋势。可以看出, 不同直径缺陷的温差变化趋势一致, 且呈现出与热源加载频率一致的周期性变化规律。最大温差随着缺陷直径的减小而减小, 但要注意的是: 在同一热流密度加载周期内, 其最佳检测时间却在不断提前。图 2-9 b) 显示了在同一直径、同一热流密度加载频率下不同深度缺陷的温差随时间变化趋势。可以看出, 随着缺陷深度增加, 温差越来越小, 深度为 0.9 mm 的缺陷的表面温度几乎与无损区域的表面温度一致。另外, 在一个热流密度加载周期内, 随着缺陷深度增大, 最大温度差出现的时间也在不断向后推迟。

对上述两种现象的解释如下：对于隔热性缺陷，随着缺陷尺寸或者深度的增加，热流向周围以及向下传播的时间也在增长，因此造成了延后性。对比以上仿真结果，其结论也与最佳频率分析结果一致。

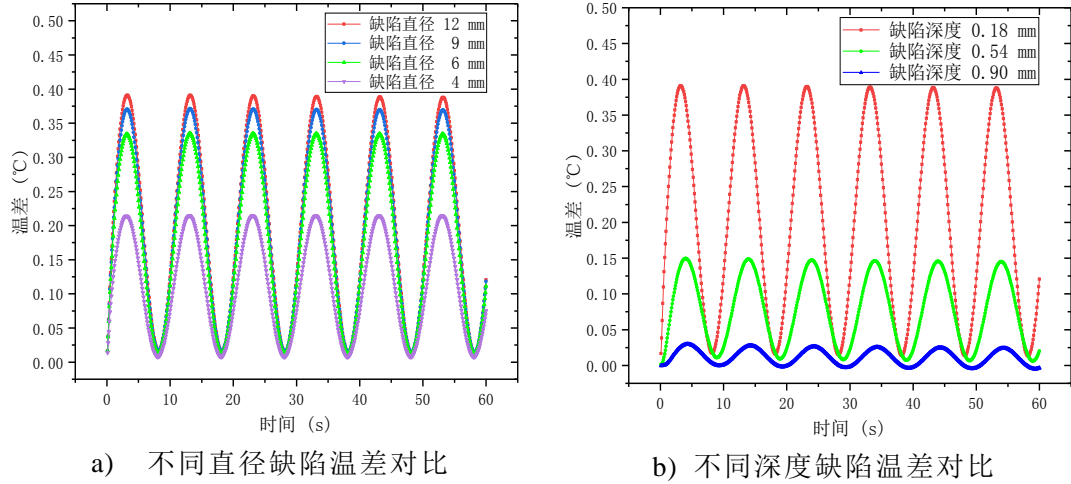


图2-9 不同直径、深度缺陷温差对比

2.4本章小结

本章依据碳纤维复合材料样本的实际铺叠方式创建了三维热传导仿真模型，并施加了不同频率的热流密度载荷进行了多次试验，获得了在正弦热流激励下样本表面的温度分布情况，分析了包括缺陷直径、缺陷深度、热流密度加载频率以及样本材料在内的单一因素对于仿真结果的影响。为更好地研究缺陷尺寸与深度对于相位差的影响，本章对所有仿真结果进行了趋势项消除，并最终选定二阶消除作为主要方法。根据趋势项消除后的结果，本章又特别研究了直径分别为 12 mm、9 mm、6 mm 和 4 mm 以及深度分别为 0.18 mm、0.54 mm 和 0.9 mm 的缺陷对最佳检测频率的影响。另外，本章分析了在同一热流密度加载频率下，不同直径及深度缺陷对最佳检测时间的影响。对于最佳检测频率以及最佳检测时间的分析均印证了以下结论：缺陷尺寸与深度均能明显影响最佳检测频率及最佳检测时间的变化，且缺陷深度对它们的影响更加明显。

第 3 章 锁相红外图像序列算法研究

3.1 引言

锁相图像序列处理是红外无损检测的一项重要内容。在图像预处理部分，本章将采用两点校正法对红外相机的非均匀性进行校正，继而对无效像元进行识别、补偿，并且探求影响检测的部分原因，最终分析、选用合适的图像预处理方法。在红外图像序列处理部分，本章将分别对经过预处理后的红外图像序列运用多帧累加平均与差分、快速傅里叶变换以及主成分分析三种方法提取缺陷的相关特征信息，并对其进行评价研究，以便更精确地实现对缺陷的识别、定位。

3.2 红外相机校正与补偿

3.2.1 非均匀校正

由于红外相机的各像素响应性不一致，再加上红外相机读出电路等硬件因素的影响，红外相机普遍具有非均匀性，因此必须进行非均匀校正。目前非均匀校正的方法主要分为两种：一种是基于参照源的校正，一种是基于场景的校正。目前使用最广泛的是基于参照源的两点校正法。

通俗的来讲，对于相同的输入，输出不同即为非均匀性。如果用直线来表示输入输出特性，那么其斜率就代表了不同的非均匀性。两点校正就是分别探测两个不同温度的黑体，利用平移和旋转变换将其响应值归一化，得到红外相机各像素的增益和偏移量，具体算法如式(3-1)与(3-2)所示。

$$A = \frac{\overline{Y_H} - \overline{Y_L}}{\overline{y_H} - \overline{y_L}} \quad (3-1)$$

$$B = \frac{\overline{Y_H} \overline{y_L} - \overline{Y_L} \overline{y_H}}{\overline{y_L} - \overline{y_H}} \quad (3-2)$$

式中 $\overline{Y_H}$ —— 高温图像中像元响应平均值；
 $\overline{Y_L}$ —— 低温图像中像元响应平均值；
 $\overline{y_H}$ —— 高温图像中多帧响应平均值；
 $\overline{y_L}$ —— 低温图像中多帧响应平均值。

图 3-1 清楚展示了两点校正法的示意图。经过校正和归一化，对于相同

的输入，各像素点的输出响应基本一致，达到图 3-1 b)所示效果。

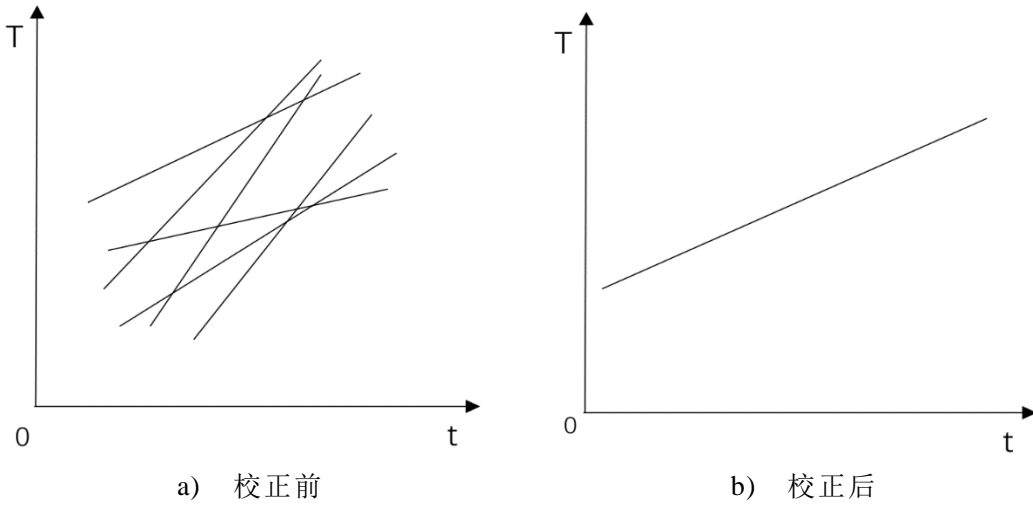


图3-1 两点校正示意图

3.2.2 无效像元补偿

无效像元是红外相机空间噪声的重要来源之一，如果相机存在无效像元，那么红外图像将会受到类似椒盐噪声的干扰。如果无效像元过多，就会对后续的图像序列处理产生较大影响。另外，无效像元响应输出与辐射之间的映射关系并无固定规律可循，因此也无法通过两点校正等方法来进行补偿。无效像元主要分为死像元和过热像元两种^[53]。死像元最明显的特点即是像元输出值基本不随温度变化而改变，抑或改变很小。像元响应率 ρ 的值等于该像元输入输出特性曲线的斜率。为简化计算，像元平均响应率通常可以用两幅高低温图像的灰度值均值来近似。对于过热像元，可以采用以下检测算法：采集黑体辐射背景下的图像序列后，分别计算图像序列中每一像元的标准差，若其标准差超过相机平均标准差 10 倍，则判定为过热像元。

基于无效像元的特殊性质，通常只能通过利用高低温图像检测的方法标记其像素位置，生成无效像元表，然后在每次图像处理时，根据查表结果，对相应位置像素值进行补偿。这种方法可以省去每次图像处理时检查无效像元的时间，操作简单，实用性强。考虑国家标准中规定的 1/10 或者 10 倍的响应率较大，在使用时可根据实际调整判定标准。例如，在本课题中，我们规定响应率低于或超过平均响应率 15%，可判定为无效像元。表 3-1 显示了通过此标准利用高低温图像检测到的无效像元坐标。

目前无效像元有两种补偿方案：一是采用相邻前一有效像元像素值直接替代的方法，另外一种则是线性插值替代的方法。为了保证插值质量，同时

节省图像处理时间，本课题最终采用了行列四点线性插值法。无效像元补偿的具体方法如图 3-2 所示。

表 3-1 无效像元统计表

像素坐标	像素坐标	像素坐标	像素坐标	像素坐标
(9,8)	(9,9)	(9,13)	(9,14)	(10,15)
(11,8)	(11,13)	(14,8)	(14,13)	(18,9)
(36,533)	(36,535)	(38,532)	(39,540)	(41,532)
(41,537)	(47,541)	(48,537)	(50,160)	(50,542)
(53,541)	(53,542)	(54,541)	(54,543)	(61,536)
(414,545)	(454,105)	(457,96)	—	—

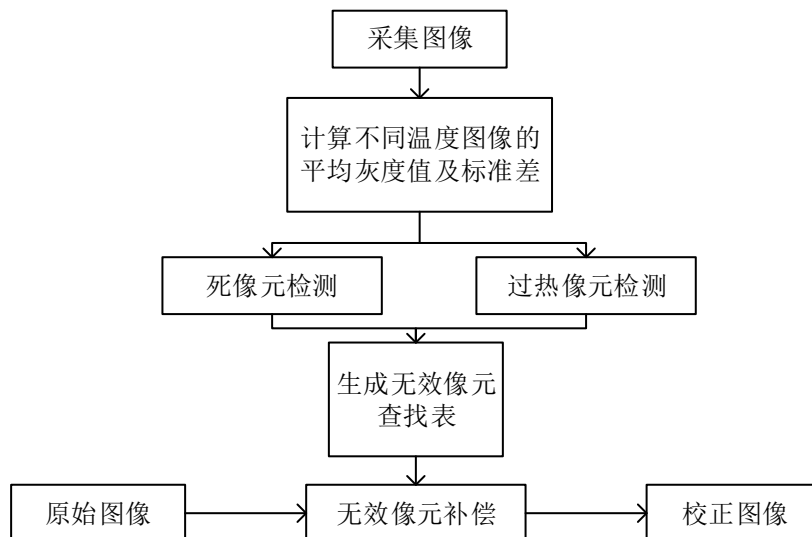


图3-2 无效像元补偿示意图

3.3 图像预处理

顾名思义，图像预处理就是在对图像进行分析前要进行的一项初步工作。它的主要目的是简化图像中的无关数据，并且增强图像中的有用信息，从而提高图像序列中目标识别和匹配的可靠性。因此，预处理对后续图像序列处理效果有较大的影响。

3.3.1 锁相红外无损检测影响因素分析

与其他技术一样，基于红外热成像技术的无损检测也会受到各种因素干

扰。这些干扰因素大致可以归结为以下三类：

(1) 无损检测系统硬件的影响。红外相机作为检测系统的核心元件，其系统噪声以及误差对原始红外图像质量有重要影响。例如，无效像元会导致图像存在椒盐噪声，以至于图像失真。

(2) 环境因素的影响。若样本受热不均匀或者受到环境噪声等因素的影响，那么其表面温度场分布则会失真。这将导致采集到的红外图像信噪比较低，降低算法可靠性，不利于后期处理。

(3) 检测样本的影响。若材料表面发射率较低，那么样本对于热量的吸收率及其红外热辐射率都会受到影响，不利于样本检测。

因此，为了准确识别缺陷的位置及尺寸，首要的任务是对序列图像进行预处理，去除噪声，提高图像信噪比。

3.3.2 图像预处理算法及评价研究

中值滤波法是非线性滤波，它可以有效消除随机的噪声点，使图像更真实。均值滤波可以有效减少图像的突兀灰度值。式(3-3)和式(3-4)分别展示了中值滤波与均值滤波在 5×5 邻域的像素灰度值替代公式。

$$y = \text{median}\{x_1, x_2, \dots, x_{25}\} \quad (3-3)$$

$$y = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} x_i \quad (3-4)$$

式中 x_i —— 图像邻域内某一点灰度值；

y —— 图像邻域平均值。

高斯滤波是广泛应用于图像去噪的一种平滑滤波方法。它的二维形式如式(3-5)所示。式中， σ 为标准差。以 $\sigma=1.0$ 为例，一个大小为 5 的高斯内核如图 3-3 所示。

	1	4	7	4	1
	4	16	26	16	4
$\frac{1}{273}$	7	26	41	26	7
	4	16	26	16	4
	1	4	7	4	1

图3-3 高斯内核示意图^[54]

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3-5)$$

本课题分别选取两种线性滤波（高斯滤波与均值滤波）及一种非线性滤

波（中值滤波）以相同邻域大小（邻域大小均为 5×5 ）分别对图像序列进行了处理。图 3-4 显示了对某一采集过程中第 150 帧红外热波图像采用三种滤波方法得到的处理效果。图 3-5 显示了利用上述三种滤波方法对同一图像序列相同缺陷点处理得到的温度上升曲线。

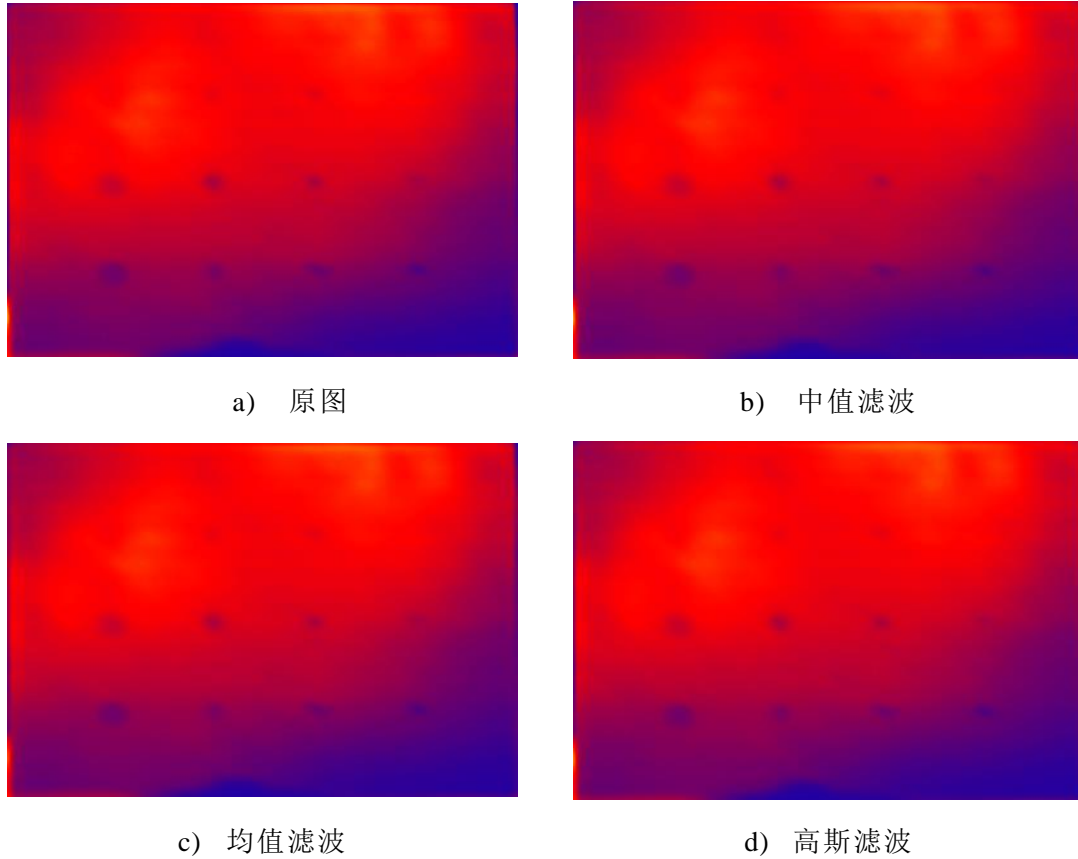


图3-4 单张图像滤波效果图

对于上述三种滤波方法，无论是通过单帧的处理效果还是图像某点的时间序列效果，都不能很明显地分辨其预处理效果，因此本课题另外采用了两种方法对图像预处理的质量进行研究。峰值信噪比（PSNR）是使用最广泛的评价方法，缺点是对人眼主观感受不能较好反应，其计算方法如式(3-6)及(3-7)所示。

$$PSNR = 10 \times \log_{10} \left(\frac{(2^n - 1)^2}{MSE} \right) \quad (3-6)$$

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|I(i, j) - K(i, j)\|^2 \quad (3-7)$$

式中 n —— 图像位数，通常待处理图像为 8 位图像；

$I(i, j)$ —— 处理后图像某像素的灰度值；

$K(i, j)$ —— 原始图像某像素的灰度值。

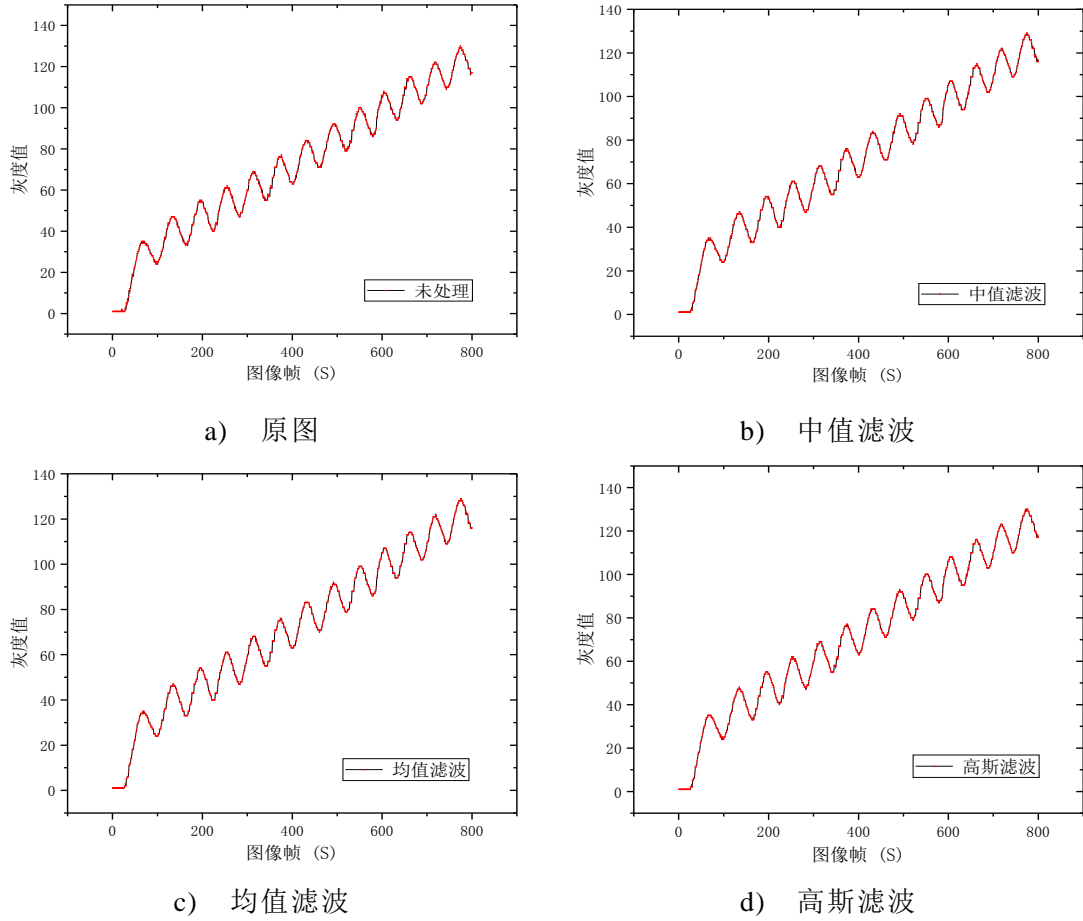


图3-5 图像序列滤波效果图

结构相似性 (SSIM) 虽然计算稍显复杂, 但它与人的主观观察感受较为吻合。因此, 对于给定的两个图像 x 和 y , 其结构相似性的值可按照式(3-8)求出。PSNR 与 SSIM 两种图像评价结果如图 3-6 所示。根据评价结果, 综合选定高斯滤波作为本课题的图像预处理方式。

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2\mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (3-8)$$

式中 μ_x —— 图像 x 的平均值；

μ_y —— 图像 y 的平均值；

σ_x^2 —— 图像 x 的方差；

σ_y^2 —— 图像 y 的方差；

σ_{xy} —— 图像 x 和 y 的协方差。

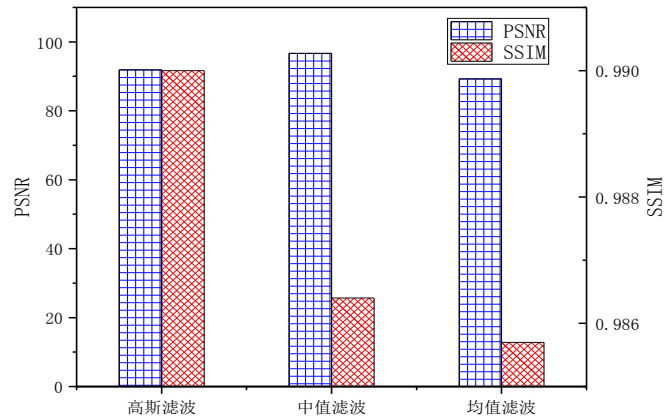


图3-6 图像滤波评价结果

3.4 图像序列处理算法

目前红外无损检测的图像处理技术主要分为单帧和多帧图像处理技术两种。图 3-7 展示了某一采集过程中的第 1、251、501 及 751 帧热波图像。可以看出，每一幅单帧图像仅仅表征了样本表面某一时刻的温度分布情况，而且图像中加热不均匀以及环境红外辐射等不利因素的影响也很明显。因此，针对单一图片，依靠传统的图像处理，很难完成缺陷的定量分析。

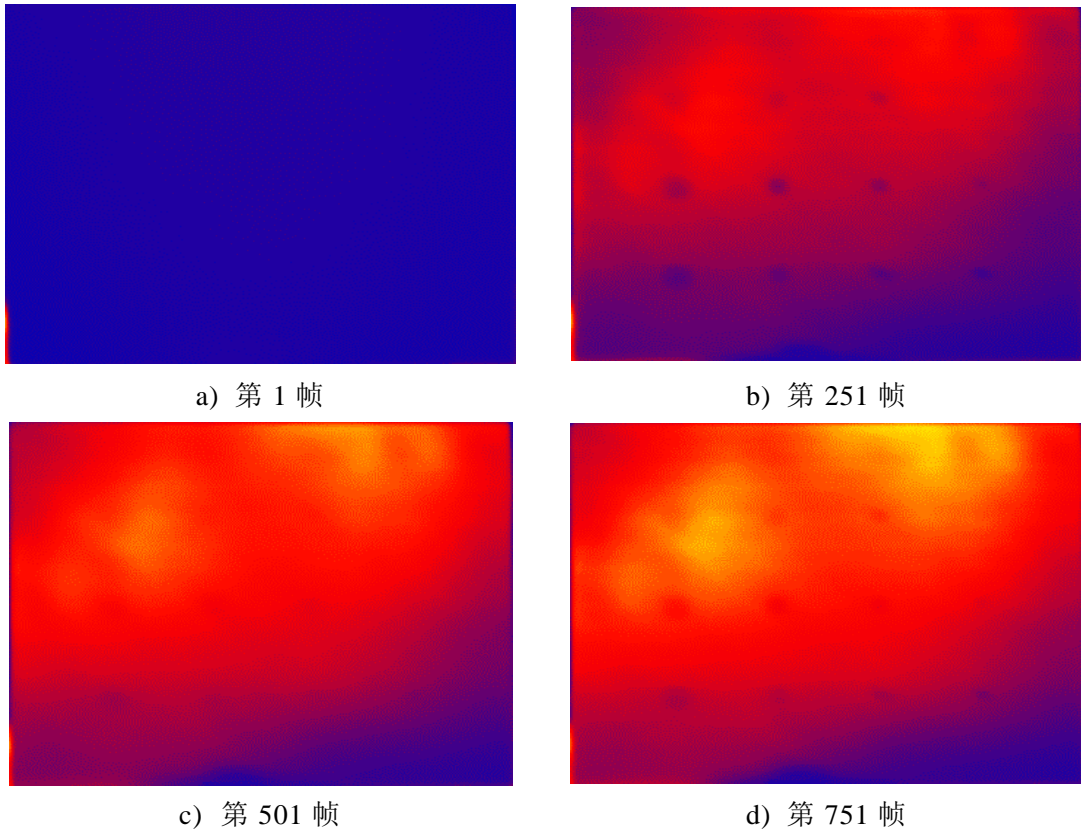


图3-7 原始图像序列

而对于红外热波图像序列，连续的图像帧之间清楚表现了样本表面温度分布随时间的变化关系。并且，样本内部的异常结构（如缺陷等）将会导致样本表面温度分布的异常变化。通过图像序列处理，可以全面获得样本表面温度分布信息，提高无损检测的准确性。另外，不同时刻的红外图像序列处理不仅能够显著降低加热不均匀的影响，还能减少环境噪声，增强微弱缺陷的显示效果。因此，建立红外图像序列处理的思想对锁相红外无损检测是十分必要的。

本课题将首先使用常规的多帧累加平均与差分法对图像序列进行处理。除此之外，本课题将分别选取基于提取相位特征的快速傅里叶变换法以及利用提取主要成分特征达到降维目的的主成分分析法完成相关图像序列处理算法的对比分析。

3.4.1 多帧累加平均与差分法

差分运算主要利用了缺陷区域和正常区域的热传导特性差异，这种差异会使缺陷区域与正常区域形成不同的热量累积。由于每一帧热图像记录的是瞬时温度场，热源入射不均匀等静态因素会加在每一帧图像上。因此，通过差分运算可以有效消除静态因素影响，凸显缺陷，具体算法如式(3-9)所示：

$$f(x, y, t) = f_1(x, y, t) - f_2(x, y, t) \quad (3-9)$$

为了减少噪声干扰，提高信噪比，本课题采用了多帧累加平均法。多帧累加平均法的具体公式如式(3-10)和式(3-11)所示：

$$h(x, y, t) = g(x, y, t) + n(x, y, t) \quad (3-10)$$

$$\bar{h}(x, y, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i(x, y, t) \quad (3-11)$$

若噪声与各像素点位置的关系随机，且其平均值为 0，那么：

$$\sigma_h^2(x, y, t) = \frac{1}{M} \sigma_n^2(x, y, t) \quad (3-12)$$

式中 $\sigma_h^2(x, y, t)$ —— $\bar{h}(x, y, t)$ 在图像所有像素点的方差；

$\sigma_n^2(x, y, t)$ —— $n(x, y, t)$ 在图像所有像素点的方差。

由式(3-12)看出，若将一幅红外图像 $h(x, y, t)$ 看做是由目标图像 $g(x, y, t)$ 以及噪声图像 $n(x, y, t)$ 的叠加，那么 M 帧图像累加平均后，可将噪声方差减小 M 倍，即将信噪比提高了 M 倍。图 3-8 a)显示了某一采集序列第 155 帧热波图像，图 3-8 b)为第 151-155 帧图像与第 51-55 帧图像经过多帧累加平均后的差分图。可以看出，将多帧累加平均与差分法结合后，既显著消除了加热

不均匀的影响，又得到了温度场的变化情况，有效凸显了缺陷区域。

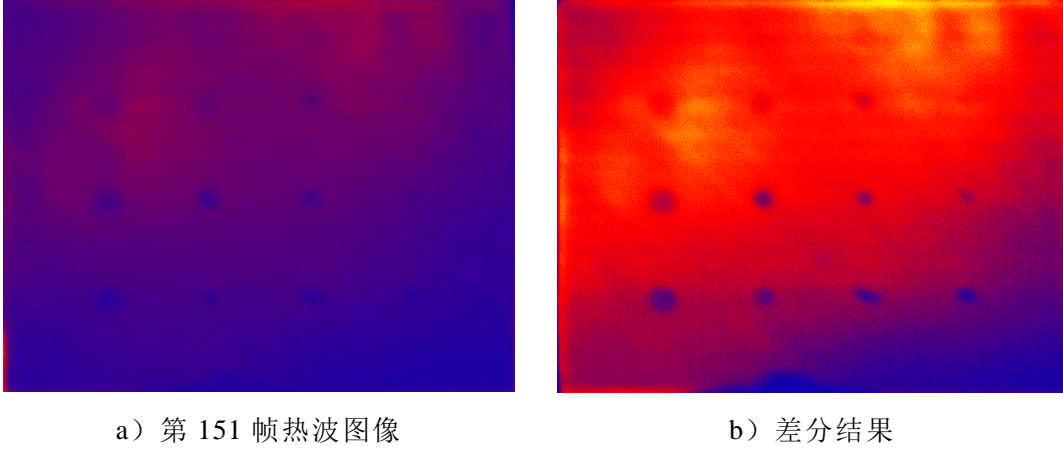


图3-8 差分效果图

3.4.2 快速傅里叶变换法

红外热波图像可以看作一维傅里叶变换分别在行列上的叠加。样本在固定频率的正弦热源激励下，其表面温度分布也必将呈现正弦变化规律，因而可以通过快速傅里叶变换从红外图像序列中将样本表面的温度信号频谱提取出来^[55,56]。离散傅里叶变换的快速算法称为快速傅里叶变换。快速傅里叶变换的具体公式如式(3-13)和式(3-14)所示。快速傅里叶变换的幅值图与相位图可通过式(3-15)和式(3-16)得到。

$$F_M(x, y) = \sum_{i=1}^N [f_n(x, y) e^{-j \frac{2\pi M n}{N}}] \quad (3-13)$$

$$M = \frac{N}{\left(\frac{f_s}{f_e}\right)} + 1 \quad (3-14)$$

$$A = \sqrt{[\text{Re}(F_M(x, y))]^2 + [\text{Im}(F_M(x, y))]^2} \quad (3-15)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(F_M(x, y))}{\text{Re}(F_M(x, y))} \quad (3-16)$$

式中 $F_M(x, y)$ —— 快速傅里叶变换后的图像；

$f_n(x, y)$ —— 原始图像；

f_s —— 采样频率；

f_e —— 激励热源加载频率。

图 3-9 显示了红外图像序列经过快速傅里叶变换处理得到的幅值图与相位图。可以看出，幅值图包含了缺陷的部分有效信息，并且加热不均匀带来

的影响也显而易见。相对于幅值图，相位图通常代表时间信息、空间信息，描述了物体的形状。通过相位图，我们不仅可以较为清楚地观察到所有缺陷信息，并且加热不均匀对图像带来的影响也被显著消除。

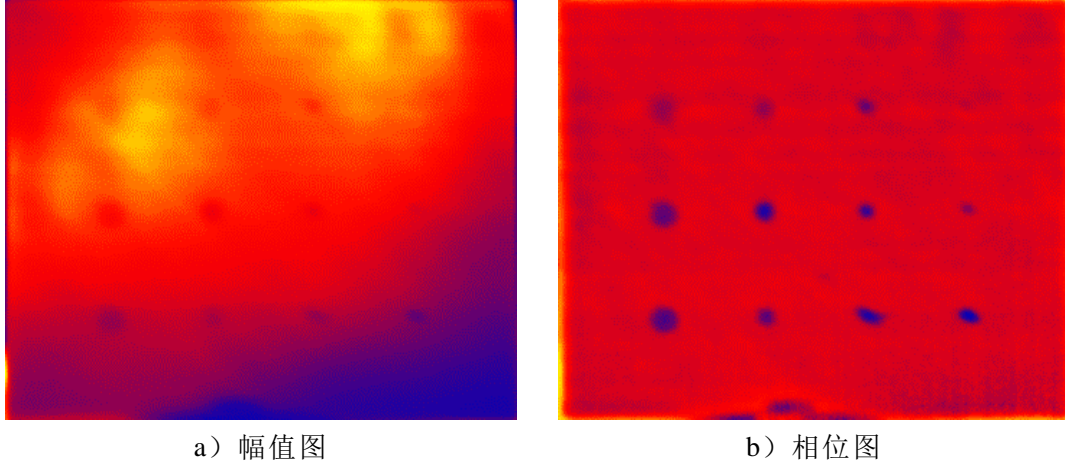


图3-9 快速傅里叶变换效果图

3.4.3 主成分分析法

主成分分析法是数理统计分析中的一种有效手段，该方法基本原理是通过数据降维的方法确定最“主要”的元素。这样既可以消除样本之间的相关性，又可以实现样本的数据压缩，去除冗余信息。近年来，国内外的研究学者运用这个算法在红外以及超声^[57]无损检测等诸多领域取得了良好效果。主成分分析法的算法步骤如下所示：

(1) 对于一个 $m \times n$ 大小的数据集矩阵，分别减去各行向量的均值生成新矩阵 \mathbf{R} ，并做归一化处理，如式(3-17)所示；

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \bar{a}_1 & \cdots & \bar{a}_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{a}_m & \cdots & \bar{a}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{R}_m \end{pmatrix} \quad (3-17)$$

(2) 获得其协方差矩阵 \mathbf{C}_R ，计算后依次排列其全部特征值 $\lambda(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ 和特征向量 $\mathbf{v}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_m)$ ，如式(3-18)及式(3-19)所示；

$$\mathbf{C}_R = (c_{ij})_{m \times m} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \cdots & c_{mm} \end{pmatrix} \quad (3-18)$$

$$c_{ij} = \text{Cov}(\mathbf{R}_i, \mathbf{R}_j) \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (3-19)$$

(3) 选取 p 个特征信号 y 使其满足式(3-20);

$$\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_p]^T = \mathbf{V}^T \mathbf{r} \quad (3-20)$$

$$\mathbf{V}^T \mathbf{C}_R \mathbf{V} = \mathbf{A} \quad (3-21)$$

式中 $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_p]$;

$$\mathbf{A} = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p\} \text{ 。}$$

(4) 提取前 q 个主成分作为特征信号，重构图像。

在本章中，我们将图像的二维矩阵数据按照从左到右，从上到下的方式转换为一维矩阵，每一幅红外图像构成新矩阵的一个行向量。然后对新矩阵使用主成分分析法进行处理。图 3-10 显示了对多帧连续红外热波图像运用主成分分析方法得到的第一主元及第二主元图。可以看出，第一主元图主要包含了样本的内部缺陷信息，第二主元图则主要包含了图像背景信息。用主成分分析法重建图像序列不仅减小了加热不均匀的影响，增强了缺陷的显示效果，而且还能保留与缺陷深度和时间有关的信息，有利于后续的缺陷识别和定量分析。但是，若样本数据量较大，主成分分析法的后置处理是以损失实时性为代价的。

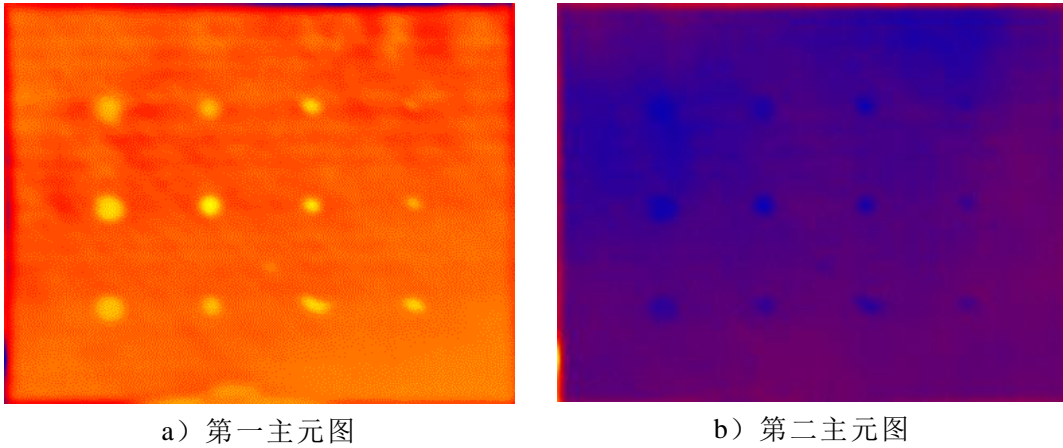


图3-10 主成分分析效果图

3.4.4 图像序列算法评价研究

为准确评价研究多帧累加平均与差分、快速傅里叶变换以及主成分分析三种图像序列处理算法，本节将采用对比度及信噪比^[58]的方式进行研究。对比度及信噪比的计算方式如式(3-22)、式(3-23)、式(3-24)及式(3-25)所示。

$$C = \text{mean}\{g(x, y)_{|(x, y) \in R_D}\} - \text{mean}\{g(x, y)_{|(x, y) \in R_S}\} \quad (3-22)$$

$$SNR = \frac{C}{\sigma_{R_S}} \quad (3-23)$$

$$g(x, y) = \frac{f(x, y) - \min\{f(x, y)_{|(x, y) \in R}\}}{\max\{f(x, y)_{|(x, y) \in R}\} - \min\{f(x, y)_{|(x, y) \in R}\}} \quad (3-24)$$

$$\sigma_{R_S} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [f(x, y)_{|(x, y) \in R_S} - \text{mean}\{f(x, y)_{|(x, y) \in R_S}\}]^2}{n-1}} \quad (3-25)$$

式中 R_D —— 缺陷区域；

R_S —— 无损区域；

$g(x, y)$ —— 归一化灰度值；

σ_{R_S} —— 标准差。

本节分别选取多帧累加平均与差分法得到的差分图、快速傅里叶变换法得到的相位图以及主成分分析法得到的第一主元图作为研究对象。为保证对比效果，均选取三幅图像中相同的缺陷位置进行研究。为减小随机误差，采用大小为 5×5 的区域代替中心像素点，最终得到的对比度及信噪比结果如图 3-11 所示。本课题最终选用对图像评价更为客观的信噪比方法作为主要依据。可以看出：主成分分析法对图像缺陷信息的表达更为清楚、完整。

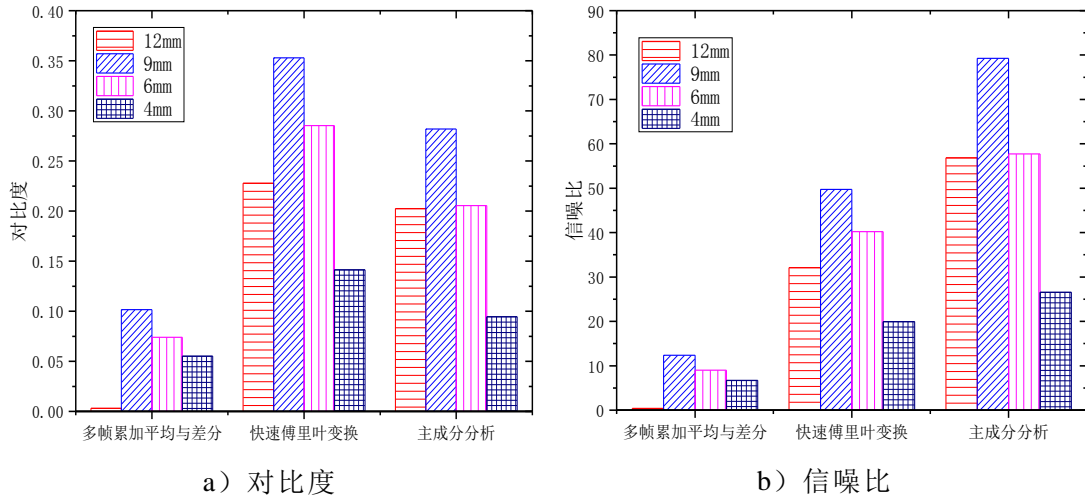


图3-11 图像序列算法评价

3.5 本章小结

本章在完成红外相机的非均匀校正与无效像元检测、补偿工作后，分别围绕红外热波图像序列预处理以及图像处理两部分内容展开了叙述。在预处理环节，既分析了影响红外无损检测的因素也提出了相关解决方案，并对不

同的滤波方法进行了评价研究。在图像序列处理环节，本章提出了包括多帧累加平均与差分法、快速傅里叶变换以及主成分分析在内的三种图像算法，并分别对其处理效果进行了评价研究。实验表明：相对于其他两种算法，主成分分析法对于缺陷的展示效果更好。

第 4 章 机翼缺陷的可视化与量化研究

4.1 引言

经过上一章的红外图像序列处理，本课题得到了包含较多缺陷特征信息的图像。本章将在上一章的基础之上，应用包括边缘检测、阈值分割以及分水岭等方法在内的图像分割技术以及相位-偏移、灰度三维重建技术进行图像后处理，以便更加直观、清晰地展示红外图像序列算法处理效果，完成课题预设的缺陷可视化目标。另外，本章将运用极值、导数等数值分析方法完成对缺陷位置、尺寸的量化估计，继而用超声 C 扫描的方法验证缺陷信息，并分析误差原因。

4.2 机翼缺陷的可视化研究

本节的缺陷可视化研究主要以图像分割为主，主要目的是增强碳纤维机翼缺陷的可视化效果。目标分割是红外目标识别的重要步骤，将直接影响后续的量化评估工作。

红外热波图像的分割虽与传统图像类似，但是也存在一些难点，最主要的就是以下两点：一是红外图像为热源成像，因此图像边界大多模糊不清；二是目标区域并无明显特征信息可以利用。对于灰度值的不连续性特征，本课题以灰度值突变作为主要依据，主要基于边缘检测进行；对于灰度值的相似性特征，主要采用了阈值分割、分水岭算法等方法。为对比图像的分割效果，本节统一使用上一章中主元分析法的第一主元图（图 3-10 a）作为研究对象。

4.2.1 基于边缘检测的图像分割

图像的边缘往往是由图像灰度值突变像素构成的集合。因此，图像分割之前需要首先确定图像边缘像素。本节分别采用 Sobel 与 Canny 两种边缘检测算子进行边缘检测工作。Sobel 算子求解图像灰度函数梯度的步骤分两步：

- （1）分别在水平和垂直两个方向上求导，求导结果如式(4-1)及(4-2)所示；
- （2）对图像的每一点，结合以上结果求出近似梯度，如式(4-3)或(4-4)所示。

由于使用了变分法，Canny 边缘检测算子自从在 1986 年被提出以后，一直被很多人推崇。Canny 边缘检测的步骤如图 4-1 所示。梯度幅值与 Sobel

算子计算方法相同，梯度方向的计算方法如式(4-5)所示：

$$\mathbf{G}_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{I} \quad (4-1)$$

$$\mathbf{G}_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{I} \quad (4-2)$$

$$\mathbf{G} = \sqrt{\mathbf{G}_x^2 + \mathbf{G}_y^2} \quad (4-3)$$

$$\mathbf{G} = |\mathbf{G}_x| + |\mathbf{G}_y| \quad (4-4)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\mathbf{G}_y}{\mathbf{G}_x}\right) \quad (4-5)$$

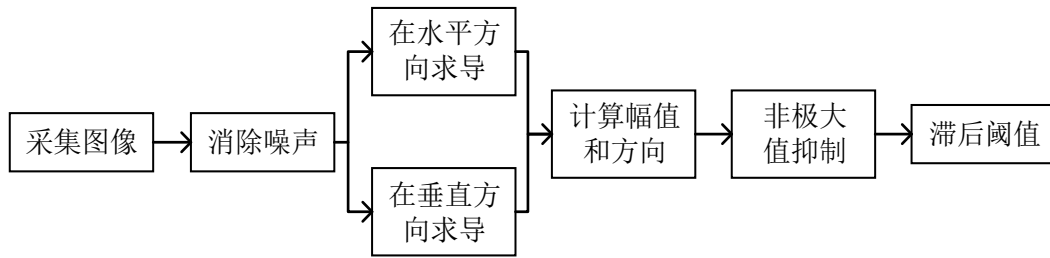
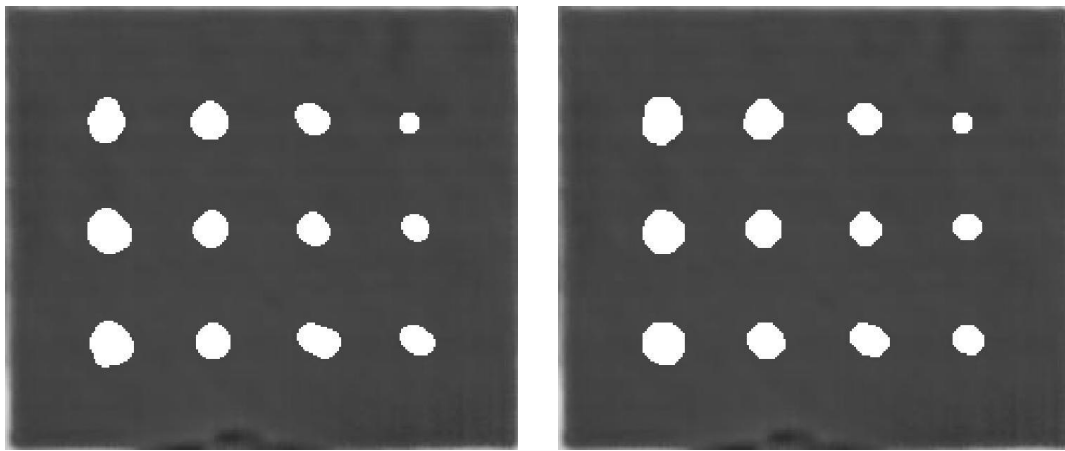


图4-1 Canny 算子边缘检测流程

图 4-2 展示了利用 Sobel 以及 Canny 算子检测到的边缘继而分割缺陷区域的效果图。观察可得，基于 Canny 算子边缘检测的图像分割效果更加真实、可靠。



a) Sobel 边缘检测

b) Canny 边缘检测

图4-2 基于边缘检测的图像分割

4.2.2 基于阈值的图像分割

由于原理简单、操作方便，基于阈值的图像分割一直是应用最广泛的图像分割算法之一。对于一幅 8 位的灰度图像 $f(x, y)$ ，阈值分割后的图像 $g(x, y)$ 由式(4-6)给出：

$$g(x, y) = \begin{cases} 255, & f(x, y) > T \\ 0, & f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (4-6)$$

式中 T —— 临界阈值；

$f(x, y)$ —— 原图像某点灰度值；

$g(x, y)$ —— 阈值分割后该点灰度值。

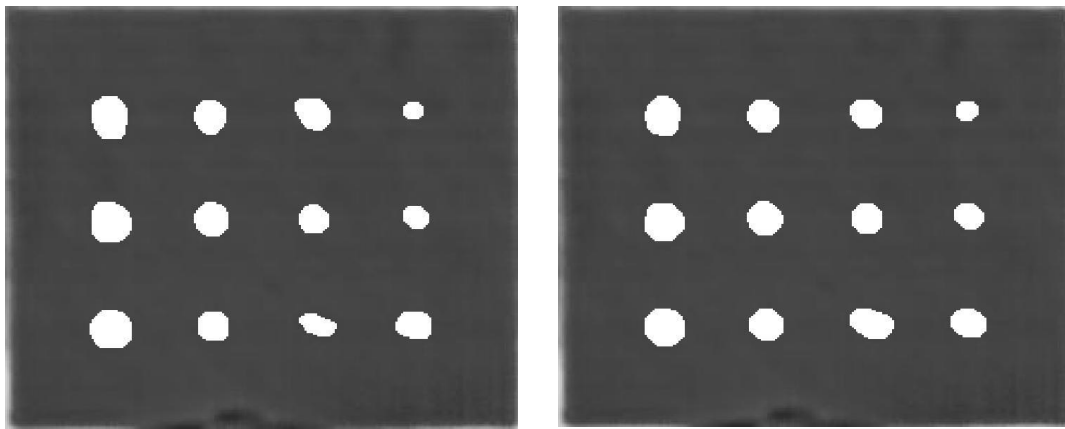
若 T 对于整幅图像适用，且取值恒定，那么其被称为全局阈值。采用二分法方便快捷确定全局阈值 T 的具体步骤如下：

- (1) 为 T 设定初始值，一般不宜取较大或较小的数；
- (2) 以 T 的取值对图像进行全局阈值处理，若灰度值大于 T ，则该像素划进新区域 G_1 ；否则，则划进区域 G_2 ；
- (3) 分别计算 G_1 与 G_2 新的均值 m_1 和 m_2 ，并更新 T ，如式(4-7)所示：

$$T = \frac{1}{2}(m_1 + m_2) \quad (4-7)$$

- (4) 重复步骤 (2) 和 (3)，直至阈值 T 的变化小于预设的误差范围。

当图像加热不均匀造成图像对比度不同时，单一、固定的全局阈值并不能适应图像分割的需要，因此要使用动态局部阈值对图像各部分分别进行阈值分割，虽然其时间复杂度较大，但分割效果较好。图 4-3 分别展示了全局阈值以及动态局部阈值的图像分割效果。



a) 全局阈值分割

b) 动态局部阈值分割

图4-3 基于阈值的图像分割

4.2.3 基于分水岭的图像分割

分水岭算法是形态学在图像处理中的主要应用之一，它主要通过模拟分水岭的构成来进行图像分割。对于红外热波图像，通过运用分水岭算法，可以获得缺陷相关特征信息。其具体流程如图 4-4 所示：

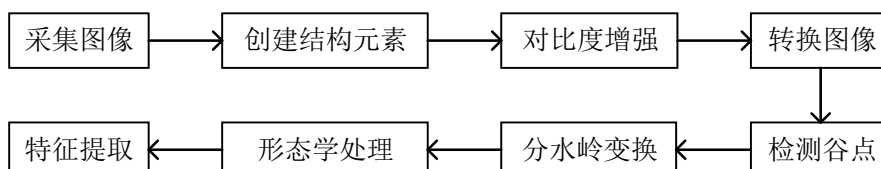


图4-4 分水岭算法流程

结构元素是形态学处理的基本要素，不同形状的结构元素可以对图像产生不同的效果。对于分水岭变换前的顶帽变换以及灰度值开运算，本课题均选用圆形结构元素。本课题主要采用顶帽和底帽变换算法进行对比度增强等操作。顶帽变换的主要应用场景是在较暗背景下检测灰度值高的物体，因此被叫做波峰检测器；底帽变换则恰恰相反，所以又被叫做波谷检测器。顶帽变换和底帽变换的具体公式如式(4-8)及式(4-9)所示：

$$H_T(A) = A - (A \circ B) \quad (4-8)$$

$$H_B(A) = (A \bullet B) - A \quad (4-9)$$

式中 A —— 原始图像；

B —— 结构元素。

另外，经过分水岭算法分割后的图像还存在很多干扰因素，影响课题对缺陷的后续处理。因此，我们还需要运用开运算等形态学处理方法去除噪声干扰，最终获得目标图像。图 4-5 展示了基于分水岭的图像分割效果。

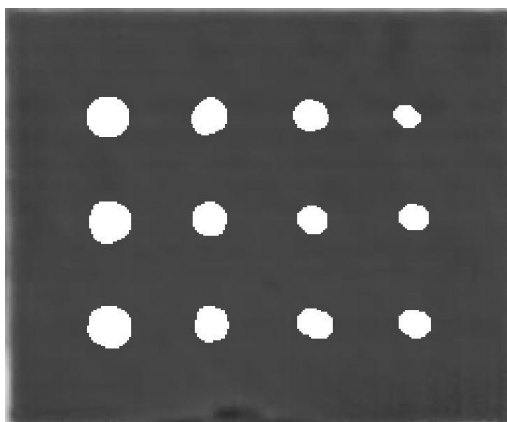


图4-5 基于分水岭的图像分割

4.2.4 机翼缺陷三维显示技术

尽管上述几种技术基于灰度值的相似性与不连续性对图像进行了分割等后处理操作，也清晰明了地展示了缺陷的尺寸、位置等信息，但还是未能立体化显示样本缺陷。相位-偏移检测技术^[59]是一种实现缺陷的可视化的方法。图 4-6 a)与 b)分别展示了上述图像的相位-偏移结果。可以看出：两幅图的缺陷位置均有明显的凸起或者凹陷现象（若原图片缺陷位置灰度值低于无损区域灰度值，则表现为凸起；反之，该位置则表现为凹陷），并可明确观察缺陷的具体特征。

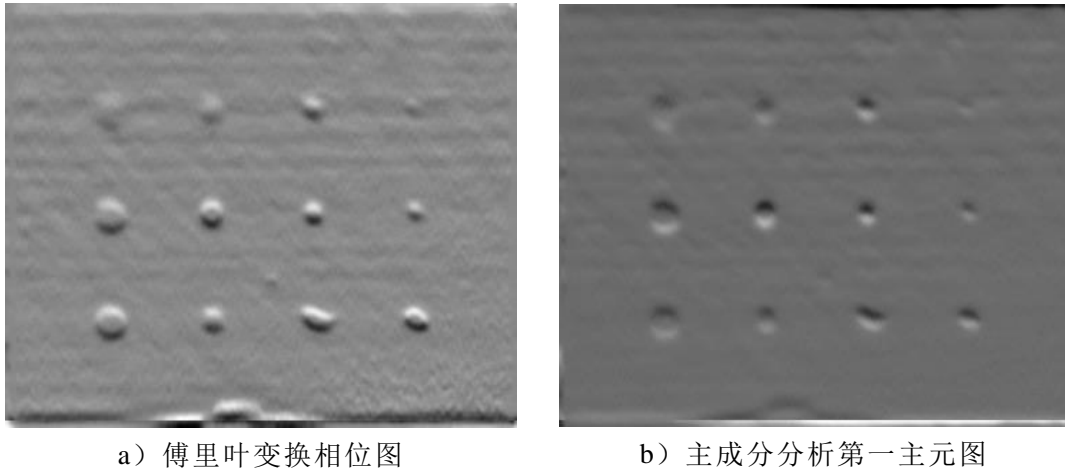


图4-6 相位偏移结果

另外，本节以图像像素点坐标构成平面坐标系，并以各像素点灰度值构成 Z 轴，重构了缺陷三维模型。图 4-7 a)与 b)分别展示了红外热波图像序列经傅里叶变换得到的相位图（图 3-9 b））以及经主成分分析法得到的第一主元图（图 3-10 a））的三维重建结果。

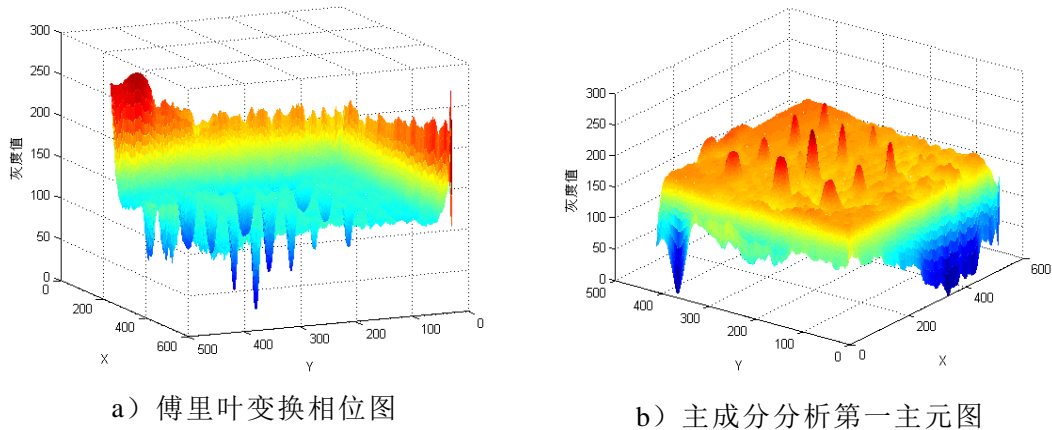


图4-7 缺陷三维显示

可以看出:两幅图的缺陷位置均有明显的向下凸起或者向上凸起现象(若原图片缺陷位置灰度值低于无损区域灰度值,则表现为向下凸起;反之,该位置则表现为向上凸起),并可明确观察缺陷的具体特征。

4.3 缺陷位置及尺寸的量化研究

当前,红外热波图像序列处理的目的是基本可分为两种:一种是尽量提高图像信噪比,增强缺陷对比度,实现缺陷可视化研究;另一种则是对感兴趣的缺陷信息进行提取,进行量化研究。

尽管本课题在上节中介绍的以相位-偏移技术均可以直观、清晰、立体地观测到缺陷的位置及尺寸信息,但其仍存在两个比较大的缺点:一是相位偏移技术得到的图像中缺陷位置不准确,其显示的位置其实为位移后图像中缺陷的位置,与原始图像相比存在偏差;另一个则是相位-偏移技术的实际效果与偏移像素和缺陷大小的比值密切相关。图 4-8 分别显示了对傅里叶变换得到的相位图以及主成分分析得到的第一主元图分别偏移 3 像素以及 30 像素(最大缺陷尺寸约 25 像素)得到的相位-偏移图。

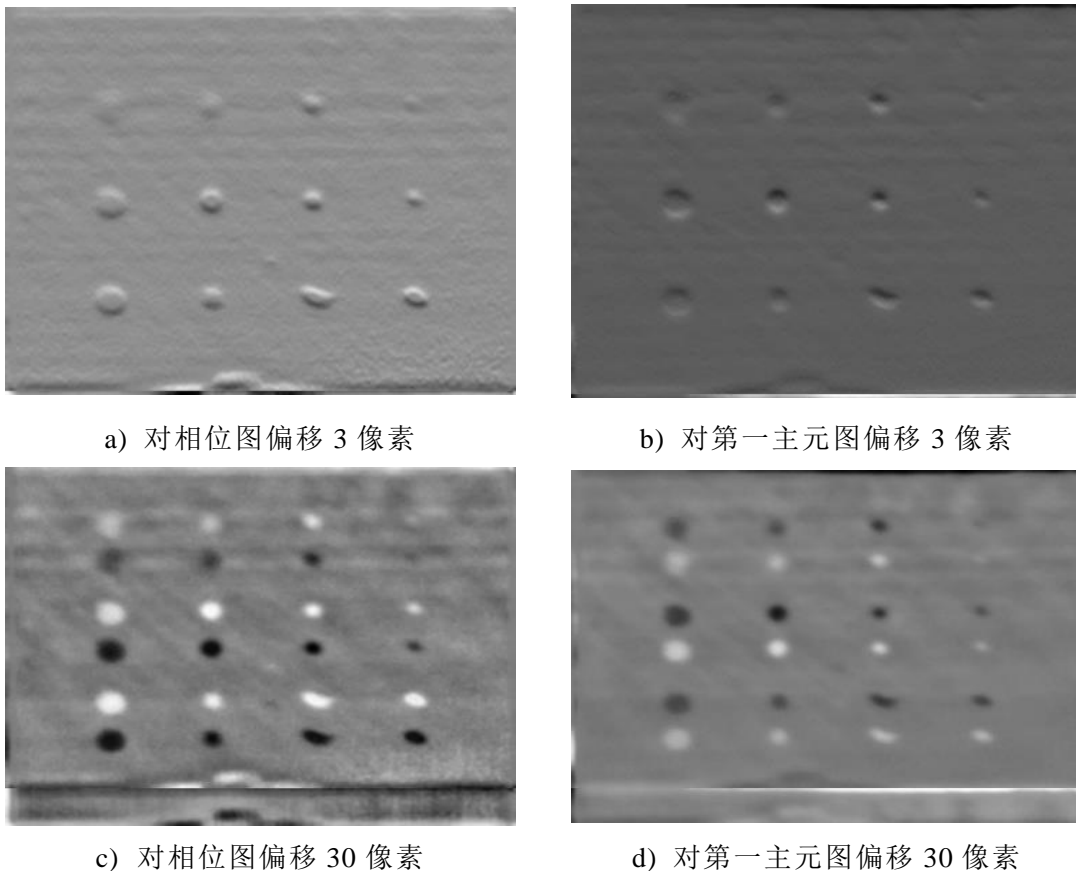


图4-8 不同像素偏移效果

通过图像可以看出：在偏移像素小于缺陷尺寸时，可视化效果较好；当偏移像素大于缺陷尺寸时，图像上会同时出现两排相同尺寸但灰度值相差较大的缺陷。因此，很容易明白：相位-偏移技术本质上利用黑白灰度对比完成了缺陷本体与阴影的“错觉”呈现，从而完成可视化的效果。

此外，以像素点灰度值为 Z 轴的三维重构也不方便对缺陷位置、尺寸的估计。值得注意的是，对图像进行分割等后处理，虽然可以清晰明了表现缺陷的尺寸、位置信息。但是由于在后处理中，为了保证可视化效果，采用了部分形态学处理方法，图像中的缺陷信息有了一定程度的失真，不能准确完成对缺陷的定量化研究。因此，本节仍将以红外热波图像序列处理的结果作为研究对象，以最大程度保证缺陷信息的准确性。

4.3.1 像素当量标定

按照一致性原则，前一章所用的红外热波图像序列均是在一次采集过程连续采集而得，其图像尺寸均为 517 像素×412 像素。而样本的实际长度为 250 mm，宽度为 200 mm。本课题根据以上信息完成了对红外相机像素当量的标定过程，其具体结果如表 4-1 所示。

表 4-1 相机像素当量的标定结果

	样本大小	图像大小	标定结果
水平方向	250 mm	517 像素	0.4836 mm/pixel
垂直方向	200 mm	412 像素	0.4854 mm/pixel

4.3.2 基于极值的缺陷位置估计

图 4-9 分别显示了用主成分分析方法得到的第一主分量图中第二行与第一列缺陷的灰度值随像素的变化趋势。

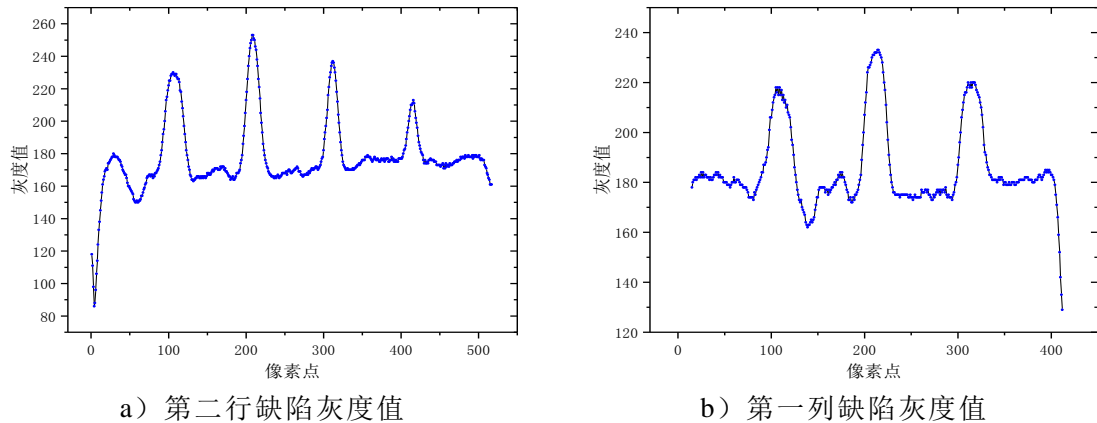


图4-9 灰度值变化趋势

通过观察，可以看出：不论是行缺陷还是列缺陷，在缺陷处都对应着一个波峰（也就是灰度值急剧上升的地方），灰度值最高的地方即为缺陷的中心。为了方便表示，我们将 12 个缺陷按照从左到右、从上到下的顺序进行了编号。表 4-2 分别展示了根据上述方法得到的缺陷中心位置及误差。可以看出，此方法基本可以准确判定缺陷的中心位置。

表 4-2 缺陷位置对比

序号	坐标	测量值 (X)	误差	测量值 (Y)	误差
1	(50,50)	50.77	1.55 %	51.46	2.91 %
2	(100,50)	100.10	0.10 %	51.94	3.88 %
3	(150,50)	149.42	0.39 %	50.97	1.94 %
4	(200,50)	198.74	0.63 %	50	0
5	(50,100)	50.77	1.55 %	101.46	1.46 %
6	(100,100)	99.61	0.39 %	100.97	0.97 %
7	(150,100)	149.90	0.06 %	100	0
8	(200,100)	199.71	0.15 %	99.51	0.49 %
9	(50,150)	50.29	0.58 %	151.46	0.97 %
10	(100,150)	100.10	0.10 %	150.97	0.65 %
11	(150,150)	150.87	0.58 %	150	0
12	(200,150)	201.19	0.10 %	150.49	0.32 %

4.3.3 基于导数的缺陷尺寸估计

虽然基于极值来判断缺陷位置取得了较好效果，但缺陷的尺寸仍然很难直接判断。因此，为了更好地研究缺陷的尺寸，本节根据缺陷灰度变化情况绘制了缺陷灰度值变化的导数曲线，如图 4-10 所示。

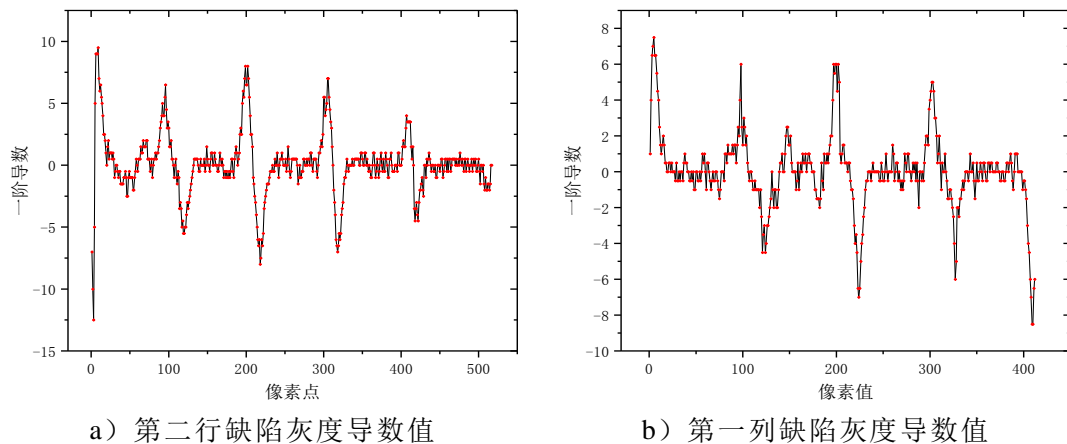


图4-10 灰度值导数变化

观察可得：原先由波峰代表的缺陷中心其导数值为 0；而缺陷的边缘为灰度变化最剧烈的地方，因此对应着极大值和极小值，也就是波峰和波谷。因此，单个缺陷的尺寸可以根据导数曲线波峰到相邻波谷的距离来进行判断。

表 4-3 分别展示了基于灰度导数方法得到的缺陷尺寸及误差。可以看出，对于较大的缺陷，其尺寸判断比较准确。但对于较小的缺陷，实验判定的尺寸误差则比较大。

表 4-3 缺陷尺寸对比

序号	理论值	实际值	误差
1	12	11.65	2.91 %
2	9	9.22	2.48 %
3	6	6.80	12.27 %
4	4	4.35	8.85 %
5	12	12.14	1.13 %
6	9	9.19	2.08 %
7	6	5.80	3.29 %
8	4	4.84	20.89 %
9	12	11.65	2.91 %
10	9	9.22	2.48 %
11	6	5.83	2.91 %
12	4	4.85	21.36 %

4.3.4 缺陷尺寸验证及误差分析

通过以上基于极值的位置估计以及基于导数的尺寸估计，我们能够较为准确的判定缺陷的中心位置及尺寸信息。但是对于某些缺陷，尤其是小尺寸缺陷，我们的定量化估计则误差较大。本课题使用超声 C 扫描的方法对缺陷样本进行了验证。超声 C 扫描成像的原理是超声探伤，这种方法原理简单，成像较为准确。但是超声 C 扫描扫描较慢，因此效率较低，这也是本课题采用红外无损检测的原因之一，但这并不影响其成为缺陷特征验证的重要手段。图 4-11 分别显示了 12 mm、9 mm、6 mm、4 mm 缺陷的超声 C 扫描图像。

观察扫描结果发现：在碳纤维复合材料机翼成型过程中，绝大多数缺陷的位置及尺寸与预设相同，没有发生变形。但有一小部分样本在制备过程中确实由于制备工艺的影响，聚四氟乙烯薄膜之间发生了错位及折叠现象，造成了缺陷变形及尺寸改变等影响。观察图 3-9 与图 3-10 的图像处理结果：对

于样本第三行的第三个缺陷（编号为 11），可明显观察到其形状不是预铺设的圆形缺陷，而是由于折叠错位形成的狭长型缺陷。

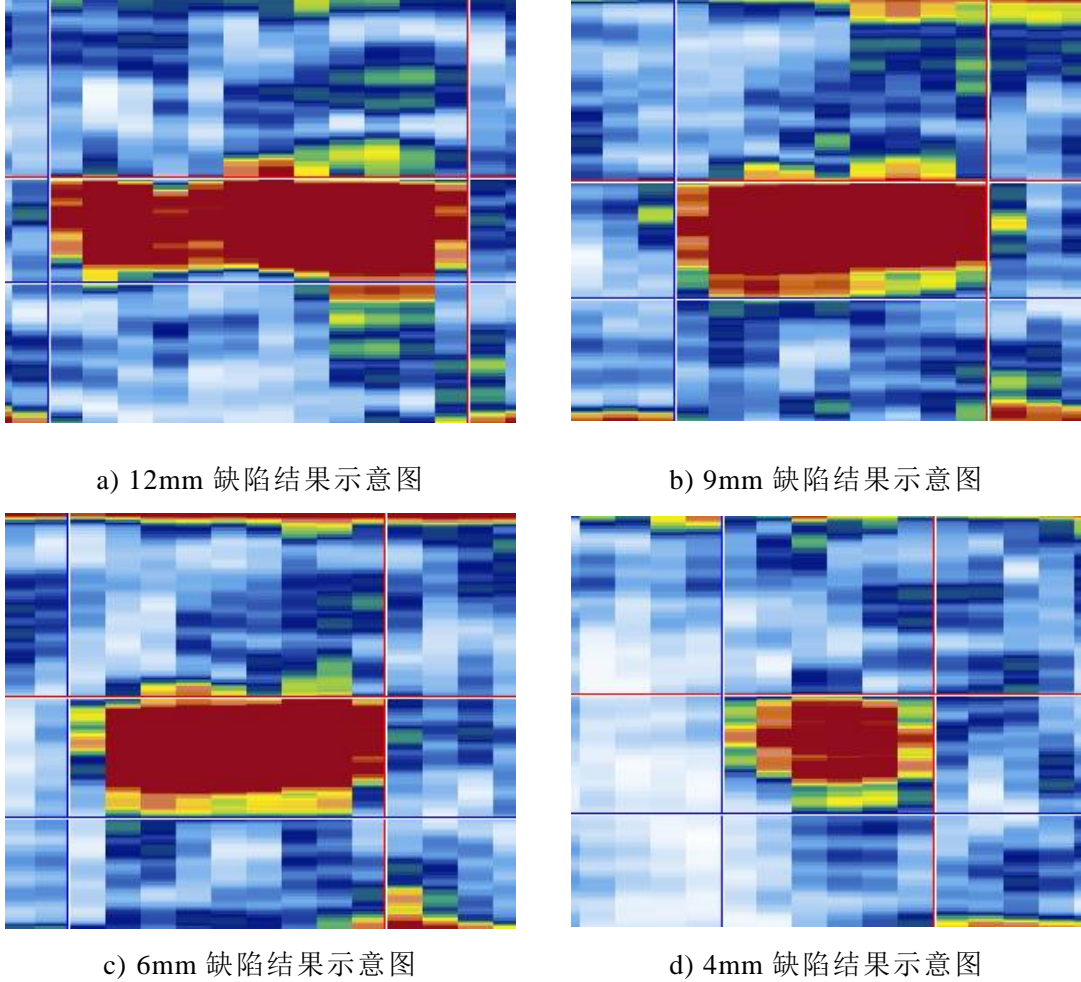


图4-11 超声 C 扫描结果示意图

4.4 本章小结

本章利用图像分割等后处理手段以及相位偏移和灰度三维重建技术清晰展示了缺陷的位置及尺寸信息，完成了缺陷的可视化研究。在图像序列处理的基础上，本章还利用极值及导数等数值分析方法完成了缺陷位置及尺寸的量化评估，继而通过超声 C 扫描的方法验证了红外无损检测算法的准确性，并分析了误差原因。

第 5 章 碳纤维机翼试件缺陷的实验分析

5.1 引言

在本章之前，本课题先后对碳纤维复合材料样本缺陷进行了有限元仿真分析、图像序列处理以及可视化、定量化研究等工作。为了验证平台可靠性以及图像算法准确性，本章将在搭建完成锁相红外无损检测实验平台的基础上，分别对内置聚四氟乙烯薄膜缺陷与含平底孔缺陷的碳纤维复合材料机翼样本进行实验处理，并对比、分析实验结果。

5.2 锁相红外无损检测系统搭建

本课题搭建的无损检测系统主要分为硬件和软件两部分。硬件主要包括计算机处理模块、高分辨率红外相机以及热源激励系统等。软件部分主要由图像采集、图像序列处理以及系统管理等模块组成。锁相红外无损检测系统的示意图与实物图如图 5-1 所示。

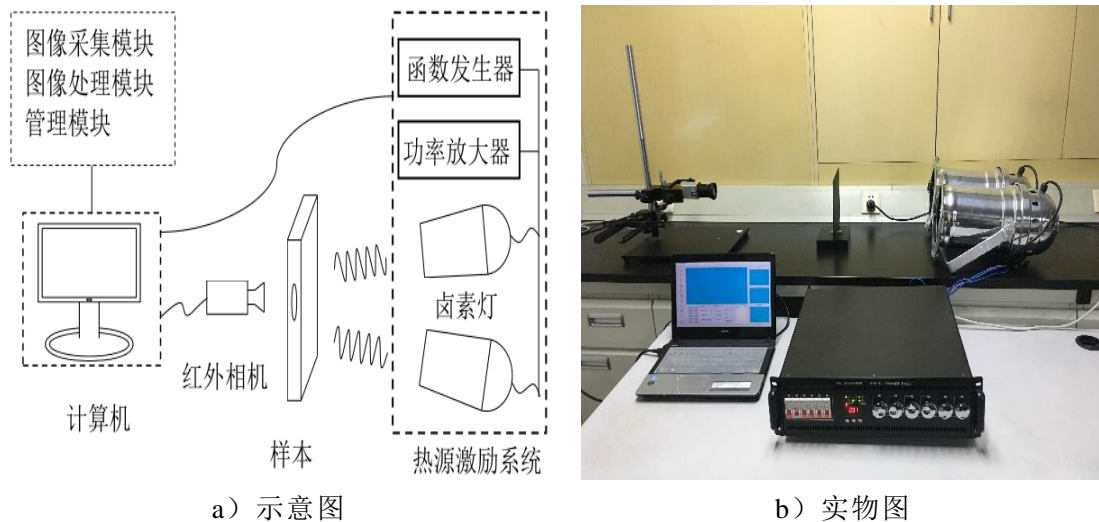


图5-1 锁相红外无损检测系统

5.2.1 硬件系统搭建

5.2.1.1 红外相机

红外相机是本课题进行红外无损检测的关键设备，通过光机扫描获取样本表面温度分布，并以图像灰度值的方法呈现出来。如果将普朗克定律对波

长从 $0 \rightarrow \infty$ 积分, 即可得到斯蒂芬-玻尔兹曼定律, 如式(5-1)所示。该定律是本课题进行红外图像采集的基本依据。

$$M_b = \sigma T^4 \quad (5-1)$$

式中 σ —— 斯蒂芬玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$;

T —— 绝对温度。

按照工作温度, 红外相机可以分为制冷型与非制冷型两种。制冷型探测器的精度较高, 但是价格昂贵而且其制冷系统不宜携带、容易发生故障, 因此制冷型探测器多用于军事用途。相对于制冷型探测器, 非制冷型探测器不需要低温制冷系统, 因此具有较高的可靠性, 并且价格适宜、便于携带, 所以广泛应用在工业以及民用领域。因此目前红外相机也主要分为短波、中波与长波红外三种。值得注意的是, 短波红外主要是采集环境辐射来作为成像依据, 因此不具有测温功能。

考虑以上各种因素, 本课题最终选取了 XenICs 公司生产的长波红外相机 Gobi-640-GigE 作为红外成像设备, 其最大精度可达到 $0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。其具体参数如表 5-1 所示。

表 5-1 Gobi-640-GigE 性能参数

相机指标	相机参数
材料	非晶硅
制冷	否
精度	$0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$
帧率	50 HZ
分辨率	640×480

5.1.1.2 热源激励系统

本课题的热源激励系统主要分为三部分: 热激励源、函数发生器以及功率放大器。顾名思义, 热激励源的主要作用是对样本进行加热, 使热量按照预设形式在样本中周期性的堆积。考虑到样本的实际特点和检测环境, 本课题的热激励源最终选用两个功率为 1000W 的 PAR64 卤素灯, 其优点是便于操作、热量较高。因课题为基于锁相的红外热成像无损检测研究, 因此还必须配备函数发生器以及功率放大器来对正弦信号进行调制放大, 进而控制卤素灯的热量输出。

5.2.2 软件系统搭建

根据实际需要，本课题设计的红外无损检测软件主要分为三个模块：图像采集显示、图像处理以及系统管理模块。其中，图像采集模块负责根据预设频率进行红外热波图像的单帧及多帧序列的采集工作。课题自主开发的软件系统将采集频率从原先的 20 帧提高到 50 帧，满足了实际采集需要。图像处理模块主要负责对采集到的红外热波图像序列进行预处理、处理以及后处理等操作，并完成图像像素灰度值读取、缺陷位置及尺寸测量等工作，以便为后续缺陷的可视化和定量化研究提供依据。系统管理模块则主要是为软件使用者提供读取默认配置、系统管理及其他附属功能。

图 5-2 为锁相红外检测软件的主界面，其中中间上部为主显示区，用来显示图像采集结果、图像序列处理结果；中间下部为操作区，主要用来进行开关相机、实时显示、连续采集等各种相机操作以及设置图像处理的相关参数；右部为各种图像序列处理方式的显示区，用来显示各种图像处理的最佳结果。

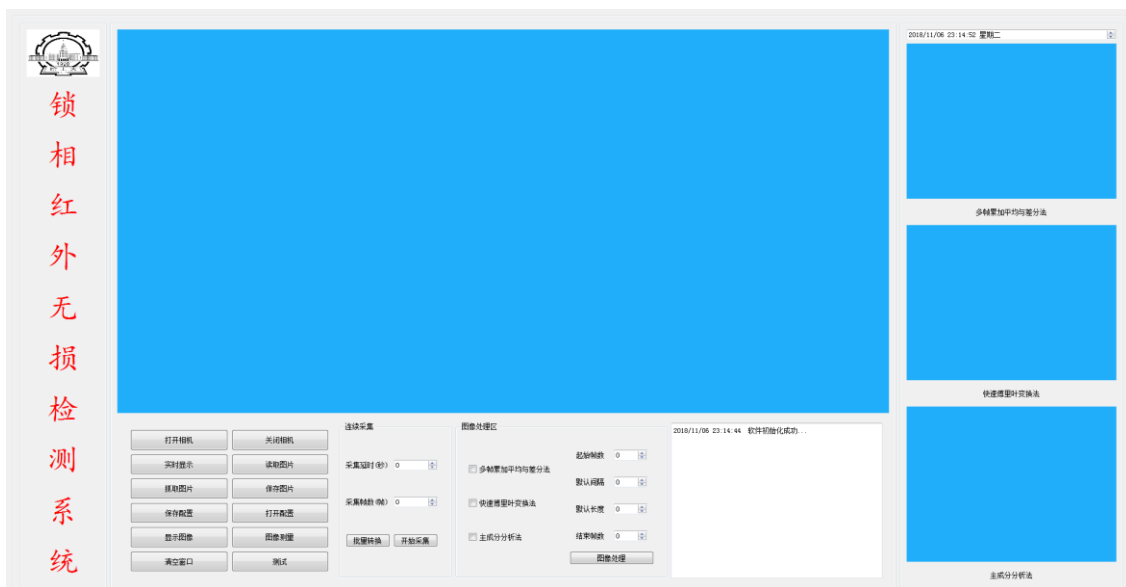


图 5-2 红外检测软件主界面

图 5-3 为图像序列处理结果的显示区与可视化、定量化估计区。上部区域为多帧累加平均与差分法结果显示区，傅里叶变换法的相位、幅值显示区以及主成分分析法的前四个主元显示区；左下方为温度曲线绘制区，用来绘制图像某点在指定时间内的温度曲线，以便方便观察温度曲线变化趋势；右下方区域为图像定量化估计处理区，用来完成图像裁剪、旋转，计算信噪比等工作。

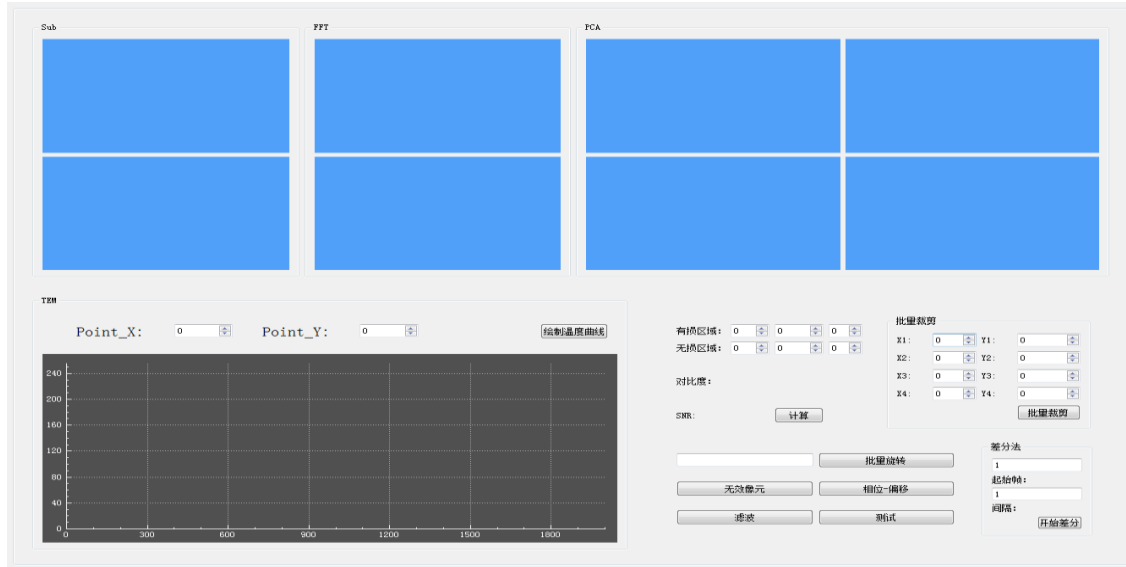
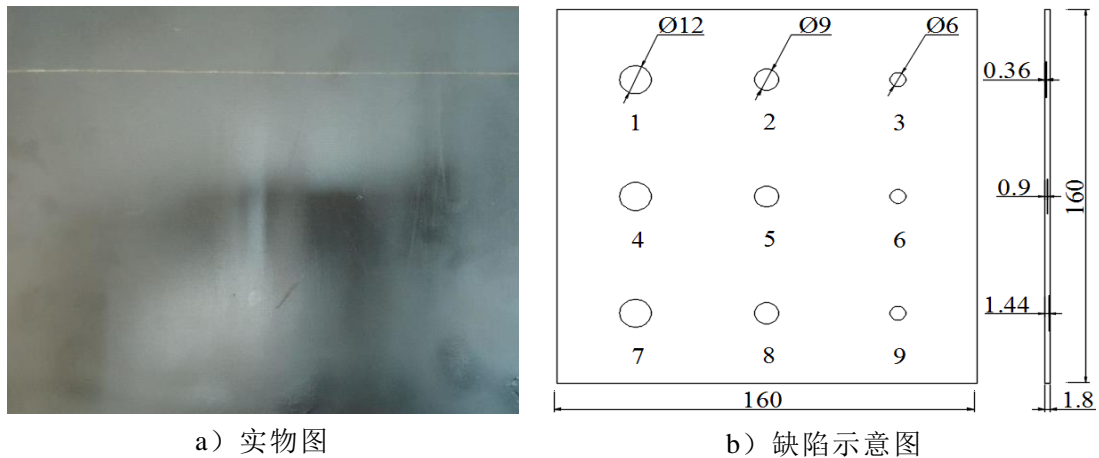


图5-3 图像显示与处理模块

5.3 内置缺陷的碳纤维机翼实验

5.3.1 实验样本制备

图 5-4 a)显示了碳纤维复合材料机翼样本的实物图，该实物样本长度为 160 mm，宽度为 160 mm，厚度为 1.8 mm，并以双层聚四氟乙烯薄膜模拟样本分层缺陷（单层聚四氟乙烯薄膜厚度为 0.05 mm）。图 5-4 b)则显示了样本中预埋缺陷位置及尺寸示意图。为方便描述，按照从左到右，从上到下的规则，本节将缺陷分别编为 1—9 号。所有缺陷相同行深度相同，其深度分别为 0.36 mm、0.9 mm 以及 1.44 mm；相同列直径相同，其尺寸分别为 12 mm、9 mm 以及 6 mm。



a) 实物图

b) 缺陷示意图

图5-4 碳纤维复合材料样本

本研究中所有样本均采用了表面处理方法，以后的实验中不再赘述。样本进行表面处理不仅可以增大样本的可见光吸收率和红外发射率，还可以消除镜面反射^[60]。表面处理最常规的做法是在样本表面涂一层易擦洗且较薄的黑色涂料。

根据激励热源与红外相机在进行红外无损检测时位置的差异，主动红外热成像技术的检测方式可分为单面检测与双面检测两种。单面检测是指激励热源与红外相机处于待检测样本的同侧，而双面检测则是指激励热源与红外相机相对于待检测样本处于异侧。单面检测与双面检测的示意图如图 5-5 所示。对于几何形状复杂的样本，单面检测较为合适；而对于导热性较差的碳纤维复合材料，则双面检测更为合适。因此本研究的所有实验均采用双面检测方式。

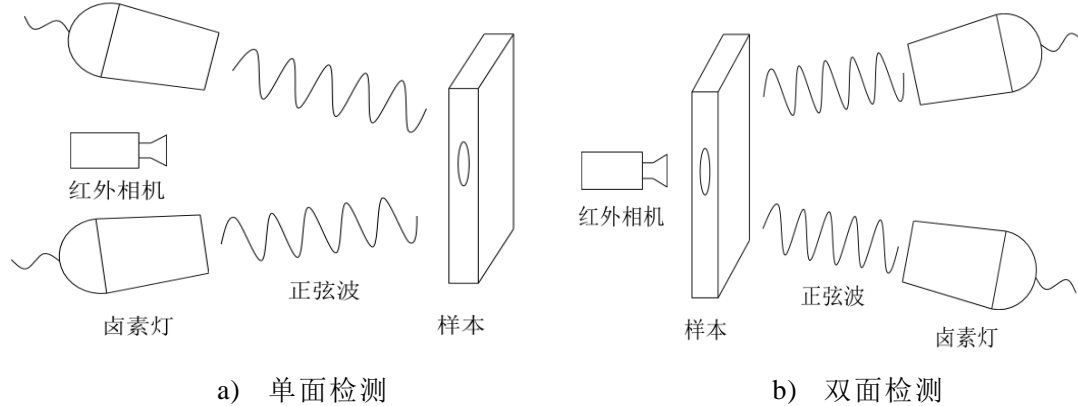
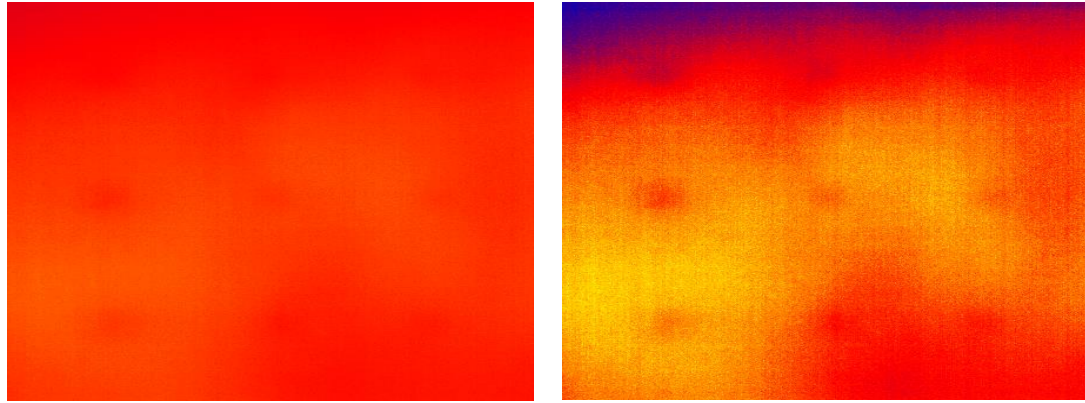


图5-5 检测方式

5.3.2 红外图像序列处理

图 5-6、图 5-7、图 5-8 分别展示了红外图像序列经过高斯滤波预处理后，运用红外图像序列算法处理得到的相关效果图。图 5-6 a) 显示了采集序列中第 184 帧红外热波图像，图 5-6 b) 则为 182-186 帧图像累加平均后与 3-7 帧图像累加平均后的差分结果。可以看出，差分图像有效突出了缺陷特征区域，而且有效消除了加热不均匀的问题。但是，利用该方法得到的图像缺少了某些缺陷信息。图 5-7 分别显示了利用快速傅里叶变换法得到的幅值图与相位图。可以看出，幅值图仅仅包含了缺陷的部分有效信息，并且受到了加热不均匀带来的影响。在相位图中，加热不均匀带来的影响不大，缺陷信息较为清晰，但仍有部分缺陷信息缺失。图 5-8 中第二主元主要包含了加热不均匀的信息，第三主元则完整包含了所有缺陷信息。可以看到，差分图、快速傅里叶变换得到的幅值图与相位图以及主成分分析得到的第二主元图都包含了

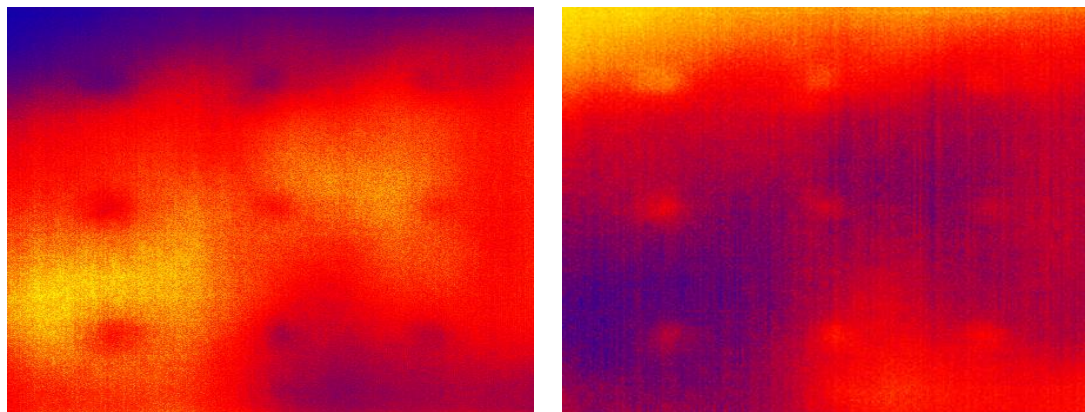
加热不均匀带来的影响，而且缺陷信息不完整，第三主元图则完整包含了所有缺陷信息。



a) 第 184 帧热波图像

b) 差分图像

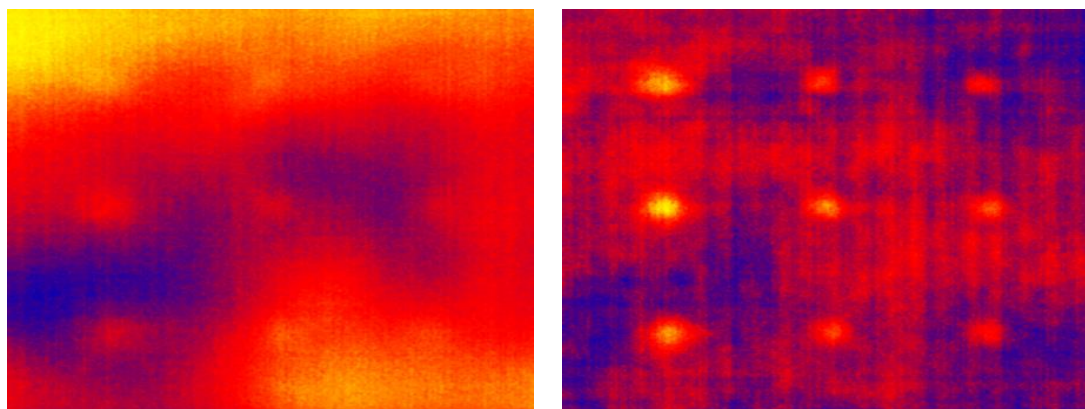
图5-6 帧间累加平均与差分法



a) 幅值图

b) 相位图

图5-7 快速傅里叶变换法



a) 第二主元图

b) 第三主元图

图5-8 主成分分析法

5.3.3 实验结果分析

由于在该次实验中，采用主元分析法得到的第三主元图包含的缺陷最为齐全。因此，本次缺陷的定量化估计将以第三主元图作为研究对象。图 5-9 分别展示了该图像中第二行缺陷与第一列缺陷的灰度值及导数值变化趋势。考虑到图像中噪声较大，干扰了对导数值的判断，因此本节将采用基于极值方法对缺陷位置及尺寸进行估计。

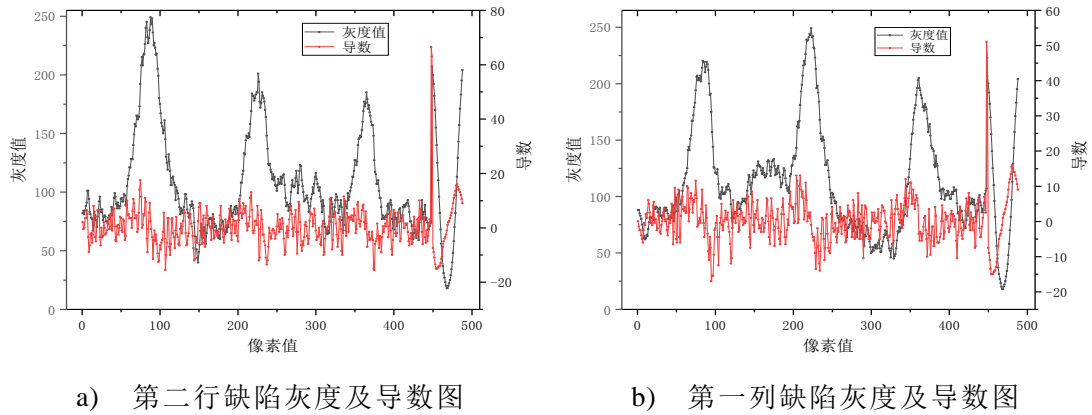


图5-9 基于极值导数的缺陷位置、尺寸估计

表 5-2 与表 5-3 分别展示了内置缺陷的碳纤维机翼样本中 9 个预埋缺陷位置及尺寸的定量化评估结果及其与真实值对比的误差。同前面的实验类似：对于缺陷中心位置的定量化评估较为精确，其与真实值的误差较小；而对于深度较大的缺陷，其尺寸测量值存在一定的偏差，但在可以接受的范围内。

表 5-2 缺陷位置对比

序号	坐标	测量值 (X)	误差	测量值 (Y)	误差
1	(30,30)	30.00	0.01%	29.64	1.20%
2	(80,30)	79.28	0.90%	28.21	5.96%
3	(130,30)	127.13	2.21%	29.64	1.20%
4	(30,80)	30.71	2.37%	78.56	1.80%
5	(80,80)	79.99	0.01%	77.85	2.69%
6	(130,80)	129.98	0.01%	78.92	1.35%
7	(30,130)	32.50	8.32%	129.63	0.29%
8	(80,130)	82.13	2.67%	128.91	0.84%
9	(130,130)	128.56	1.11%	129.98	0.01%

表 5-3 缺陷尺寸对比

序号	理论值	实际值	误差
1	12	12.50	4.15%
2	9	8.93	0.81%
3	6	6.43	7.13%
4	12	14.28	19.03%
5	9	9.28	3.16%
6	6	6.07	1.18%
7	12	13.57	13.08%
8	9	8.93	0.81%
9	6	6.43	7.13%

5.4 含平底孔缺陷的碳纤维机翼实验

5.4.1 实验样本制备

为与国内外其他学者的定量化研究形成对比，本课题也利用含平底孔缺陷的碳纤维复合材料机翼进行了实验。图 5-10 a)显示了碳纤维复合材料机翼样本的实物图，该样本长度为 250 mm，宽度为 200 mm，厚度为 7.8 mm。图 5-10 b)则显示了样本中预埋缺陷的详细位置及尺寸示意图。为方便描述，按照从左到右，从上到下的规则，本节将样本缺陷分别编为 1—20 号。其直径

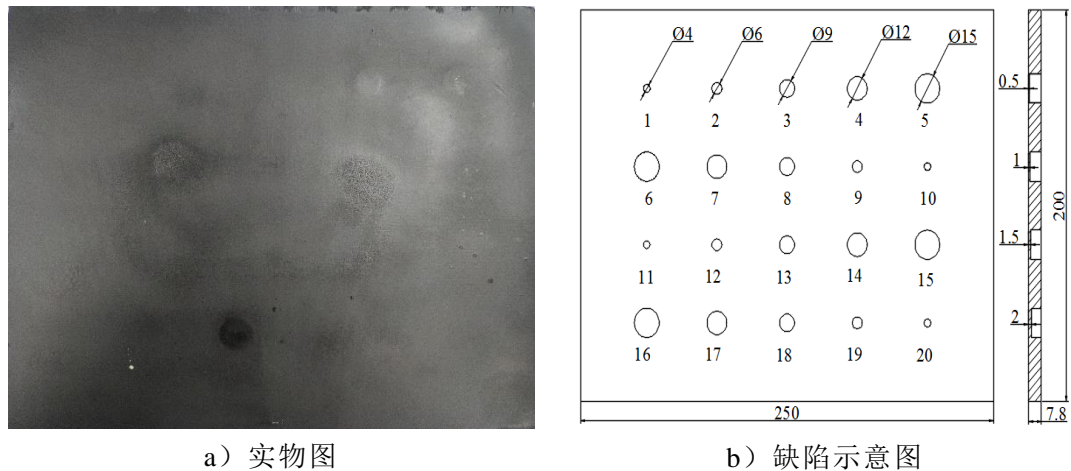


图5-10 碳纤维复合材料样本

分别为 4 mm、6 mm、9 mm、12 mm 以及 15 mm，深度分别为 0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm 以及 2.0 mm。

5.4.2 红外图像序列处理

图 5-11、图 5-12、图 5-13 分别展示了红外图像序列经过高斯滤波预处理后，运用多帧累加平均与差分法、快速傅里叶变换法以及主成分分析法等图像序列算法处理得到的效果图。可以看到，由多帧累加平均法得到差分图、快速傅里叶变换得到的幅值图与相位图以及主成分分析得到的第一主元图都包含了加热不均匀带来的影响，而且缺陷信息不完整，第二主元图则完整包含了所有缺陷信息。

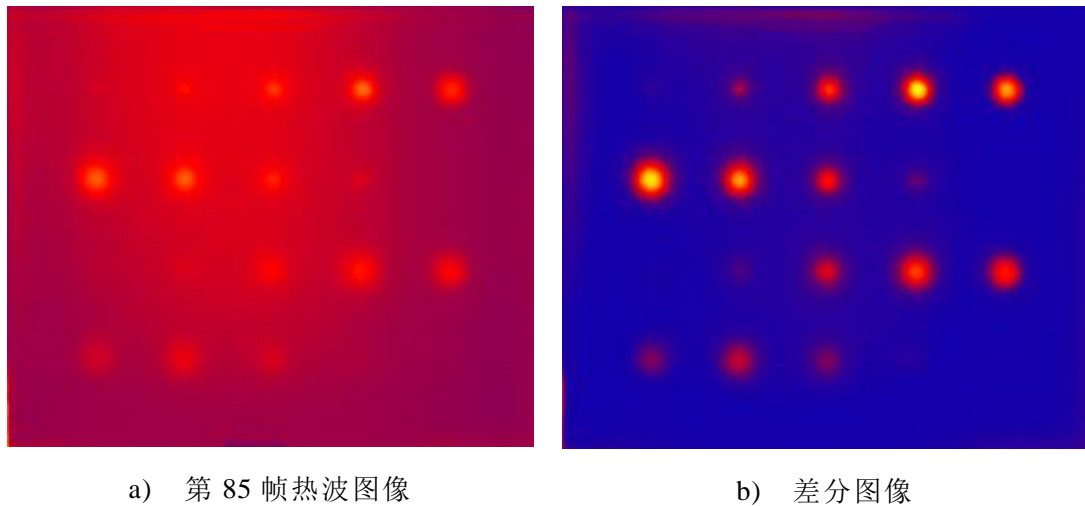


图5-11 帧间累加平均与差分法

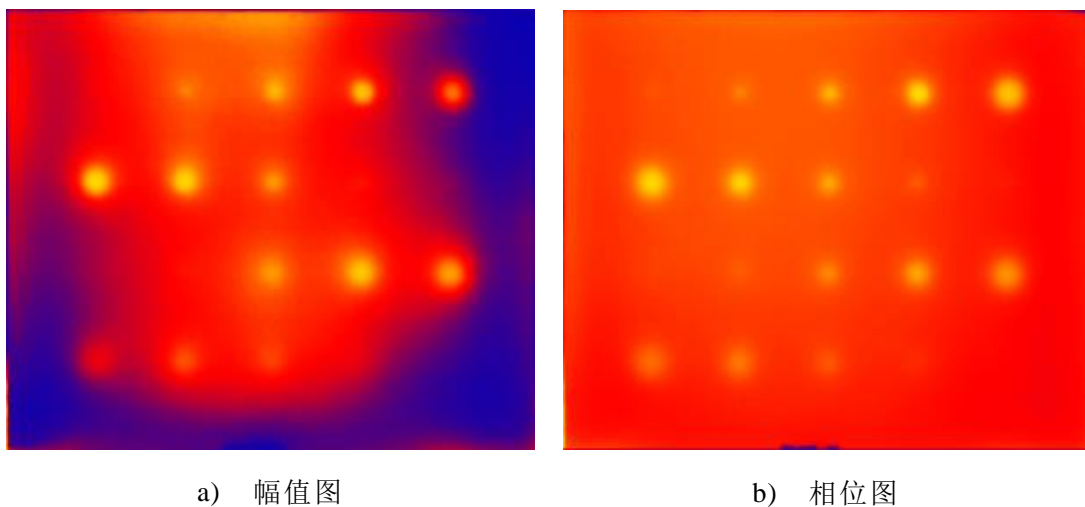


图5-12 快速傅里叶变换法

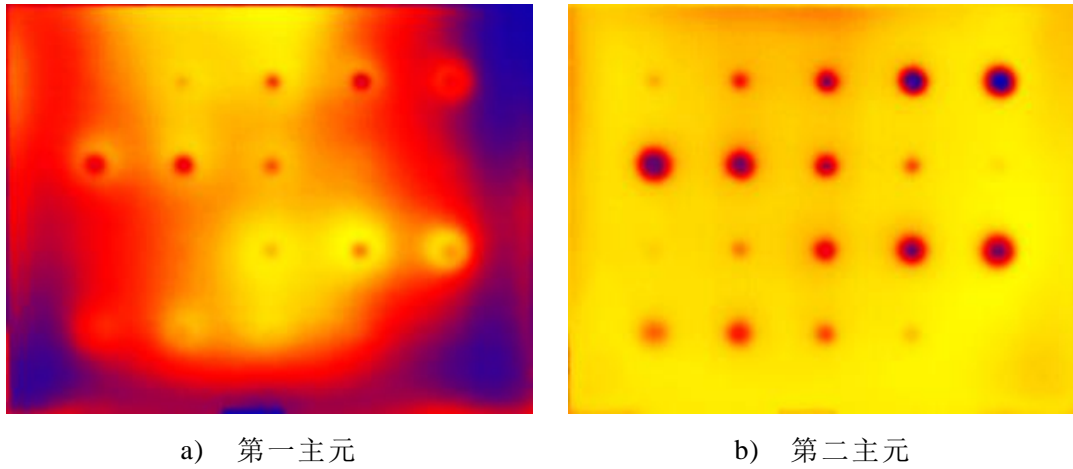


图5-13 主成分分析法

5.4.3 实验结果分析

本次将采用基于极值与导数的数值分析方法对缺陷位置及尺寸进行估计。由于该红外图像序列采用主元分析法得到的第二主元图包含的缺陷信息最为清晰，因此本次缺陷的定量化估计将以此作为研究对象。图 5-14 与图 5-15 分别展示了该图像中第一行与第二列缺陷的灰度值及其导数变化趋势。

表 5-4 与表 5-5 分别展示了机翼样本 20 个预埋缺陷的位置及尺寸的定量化评估结果及其真实值的误差。可以看出，对于缺陷中心位置的定量化评估较为精确，其与真实值的误差较小。对于深度较大的缺陷，其尺寸测量值与预设值之间误差较为明显，但也在可以接受的范围内。值得注意的是，编号为 20 的缺陷（缺陷直径 4 mm，缺陷深度 2 mm）区域与无损区域特征基本一致，说明其缺陷深度与尺寸比值已超过该系统可探测的最大值。实验结果表明，对于平底孔缺陷，本课题搭建的实验平台也具有较高的可靠性。

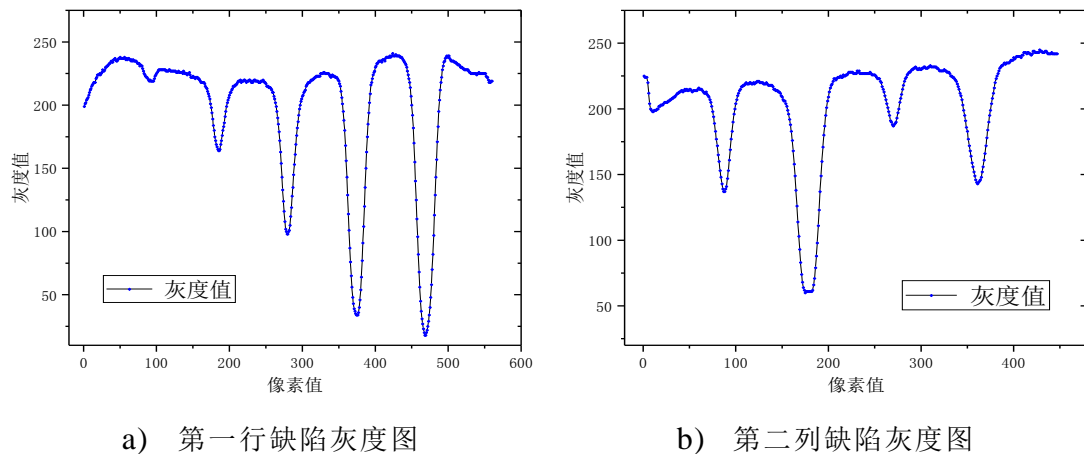


图5-14 基于极值的缺陷位置估计

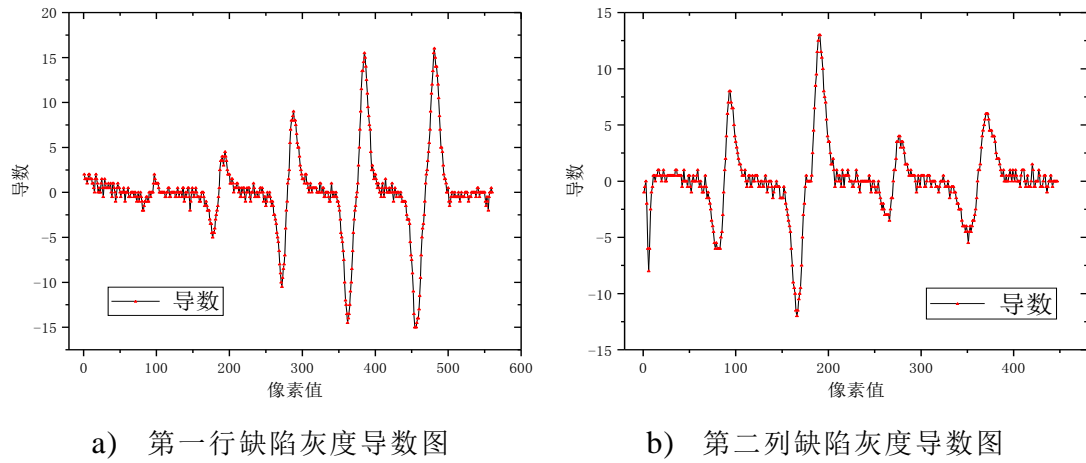


图5-15 基于导数的缺陷位置估计

表 5-4 缺陷位置对比

序号	坐标	测量值 (X)	误差	测量值 (Y)	误差
1	(40,40)	40.18	0.45%	39.37	1.57%
2	(82.5,40)	81.70	4.45%	38.92	2.69%
3	(125,40)	124.55	0.36%	38.92	2.69%
4	(167.5,40)	166.52	0.59%	38.92	2.69%
5	(210,40)	208.04	0.94%	38.48	3.81%
6	(40,80)	40.18	0.45%	80.53	0.67%
7	(82.5,80)	83.04	2.88%	79.64	0.45%
8	(125,80)	124.11	0.71%	80.08	0.11%
9	(167.5,80)	166.07	0.85%	79.64	0.45%
10	(210,80)	208.48	0.72%	79.64	0.45%
11	(40,120)	40.18	0.45%	122.14	1.78%
12	(82.5,120)	82.59	3.40%	120.80	0.67%
13	(125,120)	123.66	1.07%	120.80	0.67%
14	(167.5,120)	166.07	0.85%	120.80	0.67%
15	(210,120)	207.59	1.15%	120.80	0.67%
16	(40,160)	40.18	0.45%	161.06	0.67%

表 5-4 （续表）

序号	坐标	测量值（X）	误差	测量值（Y）	误差
17	（82.5,160）	81.25	4.97%	161.51	0.94%
18	（125,160）	124.11	0.71%	161.51	0.94%
19	（167.5,160）	166.07	0.85%	161.06	0.67%
20	（210,160）	-	-	-	-

表 5-5 缺陷尺寸对比

序号	理论值	测量值	误差
1	4	3.57	10.71%
2	6	5.80	3.27%
3	9	8.93	0.79%
4	12	11.61	3.27%
5	15	12.95	13.69%
6	15	14.73	1.79%
7	12	11.61	3.27%
8	9	9.38	4.17%
9	6	5.36	10.71%
10	4	4.02	0.45%
11	4	4.02	0.45%
12	6	5.80	3.27%
13	9	9.38	4.17%
14	12	12.05	0.45%
15	15	14.29	4.76%
16	15	12.95	13.69%
17	12	10.27	14.43%
18	9	8.48	5.75%
19	6	5.80	3.27%
20	4	-	-

5.5 本章小结

本章在完成了锁相红外无损检测平台硬件系统及软件系统的搭建后，针对内置聚四氟乙烯薄膜缺陷的碳纤维机翼样本展开研究。实验结果表明本研

究采用的红外热波图像序列算法可以有效实现缺陷的可视化与缺陷位置及尺寸信息的定量化评估。此外，与其他学者的研究形成对比，本研究还利用含平底孔缺陷的碳纤维机翼样本展开了实验，同样取得了良好效果。实验证明：本研究搭建的锁相红外无损检测平台具有较高的可靠性，采用的锁相红外图像序列算法具有较高的准确性。因此，基于锁相的红外热成像技术对于碳纤维机翼的无损检测具有较高的可行性。

结 论

随着碳纤维机翼日益广泛的应用，包括超声扫描、X 射线以及涡流在内的传统无损检测方法已经不能满足实际生产需要。而且目前基于锁相红外的碳纤维机翼缺陷检测多以定性检测为主，定量化研究则多以平底孔代替缺陷。针对以上问题，本课题基于锁相红外热成像技术研究了碳纤维机翼内置缺陷的可视化与定量化评估，并完成了以下工作：

（1）完成了内置缺陷碳纤维机翼的建模与仿真。创建了机翼分层缺陷三维导热模型，并完成了仿真分析研究；分析了内部缺陷引起的样本表面温度场变化规律，建立了温度场分布模型；研究了不同尺寸、深度的缺陷对温度场分布、最佳检测频率的影响，并探求了这些因素对最佳检测时间的影响。

（2）完成了锁相红外无损系统搭建。搭建完成了实验所需的硬件系统，根据仿真结果初步确定了激励热源加载方式、加载频率和加载时间等参数；开发了包括图像采集模块、图像处理模块以及管理模块在内的软件系统；并对红外相机相关参数进行了校正和补偿。

（3）完成了图像序列处理的研究。在周期性热源激励的条件下，采集了机翼样本表面温度分布的红外热波图像序列。通过高斯滤波等预处理手段完成了图像去噪、平滑等工作后，分别采用多帧累加平均与差分法、快速傅里叶变换法以及主成分分析法三种图像序列算法对样本缺陷特征信息进行了提取，为后续的可视化及定量化研究提供了保障。

（4）完成了机翼缺陷的可视化与定量化研究。在红外热波图像序列处理的基础上，采用图像分割等图像后处理方法以及灰度值三维重建和相位偏移技术清晰展现了样本缺陷信息，实现了被检样本内部缺陷的可视化研究。应用极值与导数等数值分析方法完成了缺陷位置及尺寸的定量化估计，采用超声 C 扫描手段进行了辅助验证并分析了误差原因。

（5）验证了实验平台及算法的可靠性。在以上工作内容的基础上，对含有内置缺陷与平底孔缺陷的碳纤维机翼样本展开了实验，并取得良好效果。实验证明：本课题所搭建的锁相红外无损检测实验平台、开发的软件系统可靠性较高；本课题研究的红外热波图像序列处理算法检测精度良好。因此，锁相红外无损检测对于碳纤维复合材料机翼缺陷的定量化研究具有很强的实用性。

尽管本课题针对红外无损检测取得了一些成果，但是仍存在一些不足，

具体表现在以下方面：

（1）为获得最佳相位响应，不同缺陷深度需要不同的调制频率进行激励，本课题为保证检测效率以及方便图像序列处理效果的对比，折衷选择了一个固定的激励频率。

（2）在进行缺陷尺寸与位置的定量化评估的环节中，本课题对于较小缺陷的估计误差较大。

因此，针对上述问题，后续的研究工作可在以下几个方面继续进行：

（1）多传感器融合。未来的研究中，可以将红外技术与其他检测方法相结合，利用各自检测方式的优势信息，综合获取缺陷特征情况，提高研究的准确性；

（2）增加深度学习应用。增加样本数量，制造类型各异的样本缺陷，改进训练模型，提高深度学习的准确性，最终实现对缺陷样本图片的自动识别、标定、评估；

（3）增加实用性。考虑更为复杂的天气状况，提高实验平台的可靠性以及图像序列算法的鲁棒性，最终实现红外无损检测技术从实验室应用到现场应用的转换。

参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24 (1) : 12.
- [2] 国家纳米中心与空客联合研究航空新材料[J]. 中国纤检, 2018, (8) : 130.
- [3] 朱苗, 高丽红, 刘刚, 等. 民用飞机VARI碳纤维复合材料性能研究[J]. 航空科学技术, 2017, 28 (10) : 35-39.
- [4] 刘兰兰, 刘夏清, 邹德华, 等. 特高压直流输电线路碳纤维六分裂导线提线钩的研制与应用[J]. 智能电网, 2017, 5 (2) : 128-133.
- [5] 陶虎春, 孙立红, 李金波, 等. 聚苯胺/气相生长的碳纤维复合材料的制备及其在微生物燃料电池中的应用研究[J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2016, 52 (6) : 1155-1160.
- [6] 佟颖. 碳纤维增强材料在建筑工程中的应用[J]. 塑料工业, 2018, 46(7): 129-132.
- [7] 焦立冰. 复合材料在汽车领域应用浅析[J]. 新材料产业, 2017 (12) : 14-17.
- [8] Vavilov V P, Plesovskikh A V, Chulkov A O, et al. A Complex Approach to the Development of the Method and Equipment for Thermal Nondestructive Testing of CFRP Cylindrical Parts[J]. Composites Part B Engineering, 2015, 68: 375-384.
- [9] 范玉青, 张丽华. 超大型复合材料机体部件应用技术的新进展——飞机制造技术的新跨越[J]. 航空学报, 2009, 30 (3) : 534-543.
- [10] Smith R A, Nelson L J, Mienczakowski M J, et al. Automated Analysis and Advanced Defect Characterisation from Ultrasonic Scans of Composites[J]. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2009, 51(2) : 82-87.
- [11] 周正干, 孙广开, 李洋. 先进无损检测技术在复合材料缺陷检测中的应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59 (4) : 28-35.
- [12] 王铮, 梁菁, 史丽军, 等. 复合材料层板超声检测缺陷评定方法分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44 (s1) : 138-141.
- [13] F. Pallikari. A Study of the Fractal Character in Electronic Noise Processes[J]. Chaos Solitons and Fractals, 2001, 12 (8) : 1499 ~ 1507.
- [14] 李鸿泽, 周立, 赵欣宇, 等. 电力电缆X射线无损检测工艺技术研究[C]// 全国第九次电力电缆运行经验交流会. 上海: 上海电力科学研究院,

2012: 499-502.

- [15] 葛浙东. 木材X射线断层扫描图像重建算法构建与系统研发[D]. 北京: 中国林业科学研究院博士学位论文, 2016: 1-2.
- [16] 董方旭, 王从科, 凡丽梅, 等. X射线检测技术在复合材料检测中的应用与发展[J]. 无损检测, 2016, 38 (2): 67-72.
- [17] 武新军, 张卿, 沈功田. 脉冲涡流无损检测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37 (8): 1698-1712.
- [18] Tao L, Ren W, Gui Y T, et al. Low Energy Impact Damage Detection in CFRP Using Eddy Current Pulsed Thermography[J]. Composite Structures, 2016, 143: 352-361.
- [19] 张荣华, 刘珊, 张牧, 等. 基于空间分布熵的电磁脉冲涡流无损检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36 (4): 804-811.
- [20] 周德强, 尤丽华, 张秋菊, 等. 碳纤维增强复合材料脉冲涡流无损检测仿真与实验研究[J]. 传感技术学报, 2014 (2): 277-282.
- [21] 穆玉伟. 基于ANSYS的锁相红外无损检测数值模拟及分析[D]. 大连: 大连理工大学硕士学位论文, 2008: 6.
- [22] Mabrouki F, Genest M, Shi G, et al. Numerical Modeling for Thermographic Inspection of Fiber Metal laminates[J]. NDT & E International, 2009, 42 (7): 581-588.
- [23] Lopez F, Nicolau V D P, Ibarra-Castanedo C, et al. Thermal-numerical Model and Computational Simulation of Pulsed Thermography Inspection of Carbon Fiber-reinforced Composites[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 86: 325-340.
- [24] Usamentiaga R, Venegas P, Guerediaga J, et al. Automatic Detection of Impact Damage in Carbon Fiber Composites Using Active Thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 58 (5): 36-46.
- [25] Grys S, Vokorokos L, Borowik L. Size Determination of Subsurface Defect by Active Thermography – Simulation research[J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 62 (2): 147-153.
- [26] Waugh R C, Dulieu-Barton J M, Quinn S. Modelling and Evaluation of Pulsed and Pulse Phase Thermography Through Application of Composite and Metallic Case Studies[J]. Ndt & E International, 2014, 66 (3): 52-66.
- [27] Munoz V, Valès B, Perrin M, et al. Damage Detection in CFRP by Coupling Acoustic Emission and Infrared Thermography[J]. Composites Part B

- Engineering, 2016, 85: 68-75.
- [28] Toscano C, Meola C. NonDestructive Evaluation of Carbon Fiber Reinforced Polymers with Ultrasonics and Infrared Thermography: An Overview on Historical Steps and Patents[J]. Recent Patents on Materials Science, 2012, 5 (1): 48-67.
- [29] Florez-Ospina J F, Benitez H D. From Local to Global Analysis of Defect Detectability in Infrared Non-destructive Testing[J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 63 (2): 211-221.
- [30] 罗景华, 王祥林, 王裕文, 等. 瞬时红外热成像检测刀具温度场[J]. 西安交通大学学报, 1989 (4): 83-88.
- [31] 王祥林, 刘伟, 王裕文, 等. 复合材料红外无损检测技术研究[J]. 西安交通大学学报, 1994 (1): 121-126.
- [32] 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.
- [33] 李艳红, 金万平, 杨党纲, 等. 蜂窝结构的红外热波无损检测[J]. 红外与激光工程, 2006 (1): 45-48.
- [34] 姜长胜, 王迪, 葛庆平, 等. 红外热波无损检测序列图像的增强方法[J]. 无损检测, 2007 (8): 440-442.
- [35] 赵延广. 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: 大连理工大学博士学位论文, 2012:19-20.
- [36] 樊俊铃, 郭杏林, 吴承伟. 疲劳特性的红外热像定量分析方法研究进展[J]. 力学与实践, 2012, 34 (6): 7-17.
- [37] 任权, 李洪升, 郭杏林. 基于应变模态变化率的压力管道无损检测[J]. 大连理工大学学报, 2001 (6): 648-652.
- [38] Li Y, Yang Z W, Zhu J T, et al. Investigation on the Damage Evolution in the Impacted Composite Material based on Active Infrared Thermography[J]. Ndt & E International, 2016, 83: 114-122.
- [39] 吕事桂, 阳再清, 丛书全. 基于导热反问题的复合材料内壁不规则缺陷 Ansys二次开发红外诊断识别[J]. 红外与激光工程, 2016, 45 (12): 6-11.
- [40] 冯琪智, 高斌, 杨扬, 等. 基于热图重构区域生长算法的碳纤维增强复合材料脱粘缺陷检测[J]. 无损检测, 2017, 39 (9): 29-34.
- [41] Liu J, Yang W, Dai J. Research on Thermal Wave Processing of Lock-in Thermography based on Analyzing Image Sequences for NDT[J]. Infrared Physics & Technology, 2010, 53 (5): 348-357.

- [42] Yang B, Huang Y, Cheng L. Defect Detection and Evaluation of Ultrasonic Infrared Thermography for Aerospace CFRP Composites[J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 60 (60) : 166-173.
- [43] Meola C, Carlomagno G M. Infrared Thermography to Evaluate Impact Damage in Glass/Epoxy with Manufacturing Defects[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 67 (5) : 1-11.
- [44] Zheng K, Chang Y S, Wang K H, et al. Improved Non-destructive testing of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composites Using Pulsed Thermograph[J]. Polymer Testing, 2015, 46: 26-32.
- [45] Zheng K, Chang Y S, Yao Y. Defect Detection in CFRP Structures Using Pulsed Thermographic Data Enhanced by Penalized Least Squares Methods[J]. Composites Part B Engineering, 2015, 79: 351-358.
- [46] Yousefi B, Sfarra S, Castanedo C I, et al. Comparative Analysis on Thermal Non-Destructive Testing Imagery applying Candid Covariance-Free Incremental Principal Component Thermography (CCIPCT) [J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 85: 163-169.
- [47] Montanini R. Quantitative Determination of Subsurface Defects In a Reference Specimen Made of Plexiglas by Means of Lock-in and Pulse Phase Infrared Thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2010, 53 (5) : 363-371.
- [48] Duan Y, Huebner S, Hassler U, et al. Quantitative Evaluation of Optical Lock-in and Pulsed Thermography for Aluminum Foam Material[J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 60 (5) : 275-280.
- [49] Usamentiaga R, Venegas P, Guerediaga J, et al. Non-destructive Inspection of Drilled Holes in Reinforced Honeycomb Sandwich Panels Using Active Thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55 (6) : 491-498.
- [50] 易美琦. 层合板分层损伤等效模拟方法及剩余强度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2016: 60.
- [51] Busse G, Wu D, Karpen W. Thermal Wave Imaging with PhaseSensitive Modulated Thermography[J]. Journal of Applied Physics, 1992, 71 (8) : 3962-3965.
- [52] Ranjit S, Choi M, Kim W. Quantification of Defects Depth in Glass Fiber Reinforced Plastic Plate by Infrared Lock-in Thermography[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2016, 30 (3) : 1111-1118.

- [53] 国家技术监督局. GB/T 17444—1998红外焦平面阵列特性参数测试技术规范[S].北京: 中国标准出版社, 1998.
- [54] Bo C, Hu H, Xu J, et al. Classification Learning Method for PCB Insertion Holes based on Shape Context[C]// IEEE International Conference on Computer and Communications. Chengdu: IEEE, 2018: 1933-1937.
- [55] Florez-Ospina J F, Benitez H D. From Local to Global Analysis of Defect Detectability in Infrared Non-destructive Testing[J]. Infrared Physics and Technology, 2014, 63: : 211-221.
- [56] He Y, Yang R. Eddy Current Volume Heating Thermography and Phase Analysis for Imaging Characterization of Interface Delamination in CFRP[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(6): 1287-1297.
- [57] Qi A L, Wang J F, Wang F, et al. Welding Defect Classification of Ultrasonic Detection Based on PCA and KNN[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 380-384: 902-906.
- [58] Gong J, Liu J, Qin L, et al. Investigation of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheet with Subsurface Defects Inspection Using Thermal-wave Radar Imaging (TWRI) Based on the Multi-Transform technique[J]. Ndt & E International, 2014, 62(2): 130-136.
- [59] Choi M, Kang K, Park J, et al. Quantitative Determination of a Subsurface Defect of Reference Specimen by Lock-in Infrared Thermography[J]. Ndt & E International, 2008, 41 (2) : 119-124.
- [60] 汪子君. 红外相位法无损检测技术及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2010: 80.

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

- [1] **Bo C**, Hu H, Xu J, et al. Classification learning method for PCB insertion holes based on shape context[C]// 2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications. Chengdu: IEEE, 2017: 1933-1937.
- [2] **Bo C**, Hu H, Lei G, et al. Non-destructive Testing of Airfoil Based on Infrared Lock-in Thermography[C]// 2018 IEEE International Conference on Information and Automation. Wuyi Mountain: IEEE, 2018: 1639-1644.

哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限

学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的学位论文《碳纤维机翼缺陷的锁相红外无损检测研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读学位期间独立进行研究工作所取得的成果，且学位论文中除已标注引用文献的部分外不包含他人完成或已发表的研究成果。对本学位论文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。

作者签名：_____
日期：____年____月____日

学位论文使用权限

学位论文是研究生在哈尔滨工业大学攻读学位期间完成的成果，知识产权归属哈尔滨工业大学。学位论文的使用权限如下：

(1) 学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文，并向国家图书馆报送学位论文；(2) 学校可以将学位论文部分或全部内容编入有关数据库进行检索和提供相应阅览服务；(3) 研究生毕业后发表与此学位论文研究成果相关的学术论文和其他成果时，应征得导师同意，且第一署名单位为哈尔滨工业大学。

保密论文在保密期内遵守有关保密规定，解密后适用于此使用权限规定。本人知悉学位论文的使用权限，并将遵守有关规定。

作者签名：_____
日期：____年____月____日

导师签名：_____
日期：____年____月____日

致 谢

自 2000 年上学以来，到今天硕士毕业，已十八年有余。在这期间，自己时常处于求学不易与学校真好的矛盾之中，难以自拔。如今，十八年的求学时光如白驹过隙，一闪而过。每当想起这些，不禁感慨万千。

感谢胡泓老师。本课题从立项到实施以至于论文撰写，胡老师都给予了多方面的指导与帮助。他渊博的学识，严谨的工作态度以及平易近人的性格都让我们受益匪浅。另外，胡老师能因材施教，寓教于乐，以他包容开放的心态给予了包括我在内的实验室成员很大的发挥空间。再一次感谢胡泓老师。

感谢高立、杜红超以及龚学健师兄一直以来的关怀。从大四刚去企业到现在，不论是生活起居，还是工作难题抑或是人生关键节点的困惑，他们都竭尽全力予以帮助。感谢以刘泽、钱荣辉为代表的师兄师姐们对我课题的指导，对我生活的关心。感谢以雷国斌、邵俊豪为代表的师弟，他们不仅经常陪伴我做实验，在日常的生活学习中也带给了我很多欢乐。感谢中航通飞华南飞机工业有限公司为本课题提供的各种帮助。

感谢本届实验室以及班级的同学们。特别是郭毅强、陈超湛、王照华、陈克凡、赵小贺、陈建楷等人，是他们陪伴我度过这两年半的研究生活，并对课题给予建设性意见。感谢张铁山等小伙伴在工作上对我的帮助，一起熬夜奋斗的经历总是令人难忘。

感谢梁国桢和柴培林两位舍友。两年多来，我们三观一致，相处和谐，他们乐观开朗的气质深深影响了我，带给我无限欢乐。感谢刘天乐、管卫星以及“动物世界”的小伙伴们，他们陪我分享过欢乐，经历过悲伤，随时给予我支持与鼓励，他们是我人生中宝贵的财富。

感谢家庭亲人对我的关心照顾以及女朋友的贴心细致。异地求学的过程中，他们总是我最温暖的依靠。

感谢哈尔滨工业大学，在哈工大求学的六年多时间里，我收获了知识与快乐，良师与益友。哈工大的底蕴、老师的教诲以及同学们的关怀，对我的性格塑造起到了很大作用。假如没有这段经历，我的人生将会黯然失色。我永远为自己是一名哈工大人而感到骄傲和自豪。

未来的道路还很长，自己能做的事情也很少，但是努力奋斗、砥砺前行的初心不会改变，规格严格、功夫到家的校训也将永远铭记。