

学校编码: 10384

分类号__密级__

学号: 32020091152442

UDC__

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于脉冲涡流信号频谱分析的缺陷表征方法

Defect Characterization Using Frequency Components
of Pulsed Eddy Current Signal

黄 琳

指导教师姓名: 曾志伟 教授

专 业 名 称: 航空宇航制造工程

论文提交日期: 2012 年 6 月

论文答辩日期: 2012 年 6 月

学位授予日期: 2012 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2012 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

脉冲涡流检测技术是近几年发展起来的一种新型的电磁无损检测技术。传统的涡流检测技术采用的是正弦信号作为激励，由于趋肤效应的存在，其对深层缺陷的检测能力受到限制；而脉冲涡流检测技术采用具有宽广频谱的脉冲波形作为激励，可以同时检测到被测部件中不同深度的缺陷，获得更多的缺陷信息，有利于航空维修，对保障飞机安全有着重要的意义，因而引起众多研究人员的兴趣。

本论文基于电磁场理论和有限元数值仿真对脉冲涡流检测技术展开研究以避免实验过程中的不确定性因素对研究工作的干扰。本文首先建立轴对称有限元模型，利用 Fortran 编程语言，分别采用时间步进算法和傅里叶变换算法对二维轴对称的脉冲涡流问题进行数值仿真，计算得到脉冲涡流的瞬态感应电压，比较了这两种有限元数值仿真方法，并且利用脉冲涡流检测实验平台，验证了数值仿真结果。

脉冲信号可以看作是一系列不同频率正弦信号的组合，表面缺陷同时影响信号的低频成分和高频成分，而下表面缺陷只影响低频成分。但是，目前对脉冲涡流缺陷识别的研究主要是通过时在域上寻找合适的特征量进行缺陷分类，并没有充分利用缺陷对不同频率分量有不同影响这一优点。所以，本文将数值仿真得到的瞬态感应电压通过快速傅里叶变换转换到频域上，在频域上对脉冲涡流信号进行分析。在频谱分析的基础上，提取由低至高的三个频率分量作为特征，用于缺陷的表征。数值仿真的结果表明，这三个特征量能很好地确定缺陷的位置、半径和深度。

关键词：脉冲涡流 数值仿真 缺陷表征

Abstract

Pulsed eddy current (PEC) testing is a new kind of electromagnetic nondestructive testing technique that was developed in recent years. Due to the skin effect, traditional eddy current testing method which employs a sinusoidal excitation is not accurate in detecting subsurface defects. In contrast PEC testing uses a pulse excitation, square or triangular waveform, which comprises a broad spectrum of frequencies and provides much more defect information than traditional eddy current testing method. It is beneficial to aviation maintenance and would play an important role in guaranteeing aircraft safety. Hence PEC testing has attracted many researchers' interest.

In this thesis, in order to avoid being disturbed by uncertain factors in experiments, the numerical study based on electromagnetic field theory and finite element method is applied to study the characteristics of PEC signals. The numerical model employs an axisymmetric formulation. Two transient modeling methods, namely the time-stepping method and the Fourier transform method, are implemented using the Fortran language to predict PEC signal, and their performance are compared. Then the simulation results are validated using experimental signals.

A pulse waveform can be treated as a summation of a series of sinusoidal waveforms with different harmonic frequencies. Surface defects affect the high and low frequency components, whereas subsurface defects only affect the low frequency components. However, most literature studies PEC defect classification by selecting features in the time domain, ignoring the rich frequency content of PEC signals. In this thesis, frequency spectrum of the predicted signal is obtained via the Fourier transform. Then a new method which uses three features selected from low to high frequency components for defect characterization is proposed. Results show that the method is effective to identify the locations and sizes of defects.

Key words: Pulsed eddy current; numerical simulation; defect characterization

目 录

摘要.....	I
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 涡流检测技术概述	2
1.3 脉冲涡流检测技术的研究现状	4
1.3.1 脉冲涡流检测技术的研究现状.....	4
1.3.2 脉冲涡流理论计算的研究现状.....	6
1.3.3 脉冲涡流缺陷识别方法的研究现状.....	7
1.4 本论文主要研究工作	9
第二章 脉冲涡流检测的电磁场理论.....	12
2.1 脉冲涡流的作用原理	12
2.2 趋肤效应	12
2.3 脉冲涡流的控制方程	15
第三章 脉冲涡流检测有限元模型的建立	18
3.1 电磁场有限元分析的基本理论	18
3.2 形函数推导	18
3.3 二维脉冲涡流问题的有限元模型	22
3.4 轴对称脉冲涡流问题的有限元模型	23
3.5 脉冲涡流数值仿真方法	25
3.5.1 数值仿真模型.....	25
3.5.2 时间步进法.....	26
3.5.3 傅里叶变换法.....	29
第四章 数值模型的验证与比较	31

4.1 脉冲涡流检测的实验平台	31
4.2 小波去噪	31
4.3 数值模型的验证和比较	33
4.3.1 实验验证.....	33
4.3.2 数值模型比较.....	34
第五章 基于频谱分析的脉冲涡流缺陷特征提取.....	38
5.1 脉冲涡流信号的频谱分析	38
5.2 缺陷分类识别	40
第六章 总结与展望	44
6.1 本文总结	44
6.2 展望	44
参考文献	46
攻读硕士期间发表的论文	50
致 谢.....	51

Table of Contents

Abstract.....	I
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Background and significance of research	1
1.2 Overview of eddy current testing	2
1.3 Research status of PEC testing	4
1.3.1 Research status of PEC technique.....	4
1.3.2 Research status of PEC modeling	6
1.3.3 Research status of PEC defect characterization.....	7
1.4 Main tasks of this thesis.....	9
Chapter 2 Electromagnetic Theory of PEC	12
2.1 Principle of PEC.....	12
2.2 Skin effect	12
2.3 Governing equations of PEC.....	15
Chapter 3 Finite Element Modeling of PEC	18
3.1 Overview of finite element method.....	18
3.2 Shape functions	18
3.3 Two-dimensional finite element modeling	22
3.4 Axisymmetric finite element modeling.....	23
3.5 Simulation methods of PEC	25
3.5.1 Simulation model	25
3.5.2 Time-stepping method	26
3.5.3 Fourier transform method	29
Chapter4 Verification and Comparison of Simulation Methods	31
4.1 Eexperiment platform of PEC testing.....	31

4.2 Wavelet denoising	31
4.3 Verification and comparison of simulation methods	33
4.3.1 Experimental verification.....	33
4.3.2 Comparison of simulation methods	34
Chapter 5 Defect Characterization Using Frequency Components ..	37
5.1 Frequency spectrum analysis.....	38
5.2 Defect characterization.....	40
Chapter 6 Conclusions and Future Work	44
6.1 Conclusions	44
6.2 Future work	44
References	46
Appendix	50
Acknowledgement	51

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

无损检测 (Nondestructive testing或NDT) 技术是发展现代工业必不可少的重要技术措施之一。无损检测是在不损伤原材料和被检测结构构件的前提下, 检测构件内在或表面缺陷及有关物理量的综合性应用技术。它在材料加工、零件制造、产品组装乃至产品使用的整个过程中, 不仅保证了质量、保障了安全, 而且在节约能源及资源, 降低成本, 提高成品率和劳动生产率方面起到了积极的作用, 在一定程度上反映了一个国家的工业发展水平^[1]。

无损检测技术的应用范围甚广, 尤其是在航空维修中, 已经成为保障飞机安全、提高飞行可靠性以及延长飞机寿命的重要技术手段。随着航空维修手段的不断提高, 无损检测在航空维修中的重要性越来越突显。从一定程度上来说, 航空的安危跟无损检测密不可分^[2]。

无损检测在航空维修中的最基本应用就是检测飞机结构损伤。

飞机损伤大致可分为以下五种: ①飞机结构零部件生产制造过程中产生的缺陷; ②飞机在起飞、飞行、着陆过程中, 由于某种原因使飞机产生过大的负载造成的结构损伤; ③日常维护过程中造成的刮伤、撞伤等; ④由于使用环境所造成的腐蚀损伤; ⑤交变载荷所造成的疲劳损伤。这些损伤如果没有得到有效的处理, 极易产生裂纹, 严重地威胁着飞机的安全。

有些结构损伤可以直接用目视观察, 但是当检查微小缺陷或是目视观察不能胜任的情况时, 就需要借助于仪器。无损检测的方法多种多样, 据统计分析, 现有的无损检测方法不少于 70 种。但目前应用得最多的还是五种常规无损检测方法: 射线检测、磁粉检测、超声波检测、渗透检测和涡流检测^[3]。其中涡流检测 (eddy current testing或ECT) 是探测导电材料中表面或近表面缺陷的一种无损检测方法, 是检测飞机蒙皮和其他部件中的裂纹、腐蚀或其他缺损的主要方法之一。相对于其他无损检测技术, ECT具有检测快、成本低、操作简单等优点。

常规的涡流检测采用正弦信号作为激励, 由于趋肤效应的存在, 其对深层缺

陷的检测能力受到限制。针对这个问题，国际上正在深入研究如何利用涡流检测技术检测被测部件深处的细小缺损。而脉冲涡流检测技术就是在此背景下发展起来的一种新型的涡流检测技术，它采用具有一定占空比的脉冲信号作为激励信号。由于脉冲信号可以看作是一系列不同频率信号的组合，其高频分量适于检测部件表面或接近表面的缺损，其低频分量适于检测部件深处的缺损，所以这样就可以同时检测到被测部件中不同深度的缺陷，获得更多的缺陷信息。

本论文将基于数值仿真，对脉冲涡流检测技术进行研究，以避免实验过程中的不确定因素对研究工作的干扰，并且在此基础上，研究缺陷分类识别的方法，以正确地对缺陷进行定性定量检测。实现对缺陷的正确评估，是航空维修的目的之一，其对控制飞机零部件的质量，保证飞机安全飞行有着重大的意义。

1.2 涡流检测技术概述

涡流检测是建立在电磁感应原理基础上的一种无损检测方法，只能用于导电材料的检测。当载有交变电流的检测线圈靠近导电试件时，由于线圈磁场的作用，试件会有感应电流产生，这种电流称为涡流。涡流的大小、相位及流动特性受到试件自身各种因素（如电导率、磁导率、形状、尺寸和缺陷等）的影响。通过观察涡流的特性判断试件性质、状态以及有无缺陷的检测方法，叫做涡流检测方法。使用涡流检测技术，涡流检测线圈不必与试件紧密接触，不需要耦合剂，检测过程不会影响试件的性能，对导电材料表面和近表面缺陷的检测灵敏度较高，在一定条件下，检测信号能反映试件缺陷的信息，因此，对管、棒、线和板材等有很高的检测效率^[3]。

按激励方式和检测原理的不同，涡流检测技术可以分为单频涡流检测技术、多频涡流检测技术、远场涡流检测技术以及脉冲涡流检测技术等^[4]。下面对这些技术简要地加以介绍。

传统的涡流检测技术中，激励信号为单一频率的正弦交变信号，产生的涡流也为类似的正弦波。根据被测材料性能和规格的不同，激励频率的范围可从几赫兹到几兆赫兹不等。传统的涡流检测技术通过分析涡流效应引起的线圈阻抗的幅度及相位的变化来实现对缺陷的检测。为了得到良好的检测信号，激励线圈必须

在缺陷的附近感应出最大的涡流，感应电流的大小与激励电流的大小及频率，被测构件的电导率和磁导率以及激励线圈的尺寸和形状有关。传统涡流检测的不足之处是激励频率单一，渗透深度小，只能检测表面和近表面的缺陷，并且对提离等参数很敏感，受到的干扰明显^[5]。

多频涡流检测技术是1970年美国科学家Libby首先提出的，用几个不同频率的信号同时激励探头线圈，由于材料的内部结构对不同频率的涡流产生不同的影响，因此通过分析处理，提取所需信号，可以有效地抑制多种干扰因素影响，提高检测的灵敏性、可靠性和准确性，对被测工件做出正确评价。它克服了单频涡流检测的缺点，已经在生产实际中得到了应用。但是多频涡流检测技术只能提供有限的检测数据，很难以可视化的方式实现对缺陷的成像检测^[6]。

远场涡流（remote field eddy current或RFEC）检测技术是一种能穿透金属管壁的低频（10—100Hz）涡流检测技术。检测金属管时，探头（包括激励线圈和检测线圈）一般采用内通过式，其中激励线圈通以低频交流电，检测线圈被置于相距激励线圈2~3倍管内径以外的“远场区”。激励线圈产生的电磁能量穿过管壁并沿着管壁传播，在远场区回到管内与检测线圈耦合。检测信号的相位与该电磁能量传播的路径直接相关，因此该方法能有效地检测金属管子的内、外壁缺陷和管壁的厚薄情况。同时，测量信号不受趋肤效应的影响，“提离效应”很小。但是，该检测方法存在以下几个缺陷：一是探头长，不利于弯管的检测；二是激励信号功率大，但检测到的信号微弱，信号提取和处理困难；三是由于激励采用的频率很低，扫描速度慢，不适用于短管检测^[7]。

脉冲涡流检测技术是近几年发展起来的一种新型的电磁无损检测技术。它的激励采用的是脉冲波形（如方波、三角波等），这些脉冲激励有着宽广的频谱。因此，与传统的涡流检测方法相比，脉冲涡流主要有以下几个优点：①脉冲涡流激励及响应包含的频率范围很广，可以提供足够多的缺陷信息；②脉冲涡流检测可以对感应磁场进行时域或频域分析，方法灵活；③提离效应或边缘效应产生的干扰信号可以在后处理中进行处理和补偿；④脉冲涡流检测系统的价格低于传统多频涡流检测系统，但效果相当于数百通道的多频涡流检测系统^[3]。基于这些优点，脉冲涡流检测技术引起了众多研究者的兴趣，成为了现代无损检测技术的研究热点之一。

1.3 脉冲涡流检测技术的研究现状

1.3.1 脉冲涡流检测技术的研究现状

美国 Iowa State University 的无损评估中心 (Center for Nondestructive Evaluation) 对脉冲涡流检测技术的研究主要集中在对飞机机身结构的检测。他们在激励线圈两端加载脉冲电流, 通过接收线圈拾取感应电压信号, 提取感应电压信号的峰值和过零时间作为特征量。实验结果表明峰值主要受腐蚀缺陷严重程度的影响, 过零时间主要和腐蚀缺陷的深度有关^[8]。National Cheng Kung University 的 H. C. Yang 等人利用脉冲涡流技术实现对镀层或是基底之一是磁性材料情况下镀层电导率和厚度的检测^[9]。

美国通用电气公司研究与发展中心 (General Electric Company Research & Development Center) 也对脉冲涡流技术进行了研究, 分析了激励脉冲参数对成像结果的影响, 认为对于特定的脉冲涡流探头, 优化激励脉冲的形状, 可以得到理想的检测结果; 对于深层缺陷的检测, 必须要有足够的激励脉冲宽度以提供足够的能量, 最终实现了对腐蚀缺陷的成像检测^[10]。

加拿大国防部飞行器研究中心 (Air Vehicle Research Section, National Defense Headquarters) 的研究人员研究发现在同一个缺陷上, 只要探头提离变化的情况下, 脉冲涡流时域检测信号都会相交于同一点, 因此他们提出了“提离交叉点” (Lift-off Point of Intersection 或 LOP) 的方法抑制提离的影响, 并且说明了“提离交叉点”是由于提离变化而导致脉冲涡流信号的幅度和相位漂移^[11, 12]。

英国 (School of Computing and Engineering, University of Huddersfield) 的科学家在研究铁磁性材料的检测时, 提出了一种集成脉冲涡流传感器和电磁声换能器 (Electromagnetic Acoustic Transducer 或 EMAT) 的方法, 即将脉冲涡流传感器和 EMAT 集成于同一个探头, EMAT 传感器置于磁轭的两端, 处于激励检测工作模式; 脉冲涡流传感器位于磁轭的中央, 由于磁轭的存在, 脉冲涡流相当于处在脉冲漏磁工作模式, 脉冲涡流信号得到了增强, 提高了检测的灵敏度和可靠性, 而且使一次检测达到了两种方法分别检测的目的, 缩短了检测时间, 提高了检测的效率^[13]。

J. Wilson 等人设计了一套脉冲涡流热成像系统, 激励脉冲频率范围为

150~400KHz。该系统通过分析试件表面加热方式和瞬态温度变化，能够在很短的时间内探测到金属裂纹^[14]。

Michigan State University 的G. Yang 和A. Tamburrino等人设计了一套基于巨磁电阻（Giant Magneto-resistance或GMR）传感器的脉冲涡流检测系统用于检测多层结构中的铆钉下裂纹，实现了对多层结构中紧固件细小裂缝的自动检测^[15]。

目前国际上，一些研究机构对脉冲涡流检测技术的研究所采用的方法的差别主要体现在以下几个方面^[4]：

1. 激励方式的不同

根据脉冲涡流检测系统激励方式的不同，可分为电压激励和电流激励。从理论上来说，电流激励是优于电压激励的，因为感应磁场主要是与线圈中的电流成正比的，而不是与激励电压成正比。所以在恒流源激励的情况下，激励线圈中的电流不会随着线圈阻抗的变化而变化。但是，在实际应用中，恒流激励在硬件电路上比较难以实现，而恒压激励的硬件电路较简单，易实现。

2. 检测方式的不同

根据脉冲涡流检测系统检测方式的不同，可分为线圈检测和磁传感器检测。检测线圈测量的是磁场的变化量，不适用于激励信号频率较低时的深层缺陷的检测，而磁传感器在低频时具有良好的响应能力。但是，在试件厚度不是很厚的检测场合，线圈检测的灵敏度高于磁传感器。

3. 信号处理方式的不同

目前，对脉冲涡流检测信号的处理，大多数都是在时域进行的，即从时域提取特征量来对缺陷进行检测，没有充分地发挥脉冲涡流频率分量丰富的优点。将时域和频域结合起来分析可以提供更多的缺陷信息，从而可以提高对缺陷检测的质量。

国内的研究人员也对脉冲涡流检测技术进行了一些研究。文献【16】对脉冲涡流检测技术的工作原理、特征提取技术、消除提离效应技术及缺陷分类的研究进展进行了综述。文献【17】设计并实现了一套完整的脉冲涡流检测系统，在对检测信号进行分析处理的基础上，提取峰值、峰值时间、过零时间等时域特征量，实现了对缺陷的定量的检测。文献【18】把脉冲涡流检测技术应用于检测金属表面裂纹，发现裂纹深度和涡流信号峰值之间有着明显的关联。文献【19】利用脉

冲涡流检测技术对表面和近表面裂纹的长度和深度进行了定量检测,提出了辨别表面和近表面裂纹的公式,并且用实验证实了这一结论。文中还指出,脉冲涡流只需要一次扫描就可以对被测试件上不同深度的裂纹实现定量检测。

1.3.2 脉冲涡流理论计算的研究现状

脉冲涡流理论计算主要有解析解法和数值解法两种方法。二十世纪九十年代以来,国际上对它们的研究进入了一个高潮。

在解析解研究方面, J. Bowler等人以半无限大导体为对象,首先证明了任意线圈的时域频域特性是由激励电流和导体反射系数的乘积决定的,进一步推导出阶跃和指数两种不同激励情况下激励电流和导体反射系数乘积的拉普拉斯逆变换,从而计算出脉冲涡流的时域响应^[20]。V. O. Haan等人基于待测导体的材料和几何特征对场传播的影响,利用傅里叶反变换,推导出半无限大和有限厚度导体上线圈感应电压的时域响应表达式^[21]。

传统的解析解法,要求严格建立和求解偏微分方程或积分方程,求解过程繁杂,只对一些特殊的简单的电磁场问题适用。在许多实际问题中,由于边界值问题过于复杂而无法求出解析解。高速度、大容量电子计算机的出现,促进了各种数值计算方法的发展。数值解法几乎适用于所有的电磁场问题的求解。

J. Pávó利用边界积分法和阻抗型边界条件,通过傅里叶反变换求解出两层导体中存在任意形状缺陷的情况下脉冲涡流的时域响应信号^[22]。R. Ludwig 和X. W. Dai采用加权余量有限元模型计算出半无限大空间中脉冲涡流的磁矢量位以及感应电流的分布^[23]。此外,他们还采用混合数值计算模型分析导体和铁磁材料中脉冲涡流的分布,以及不同的检测探头提离和材料参数(如电导率、磁导率)下脉冲涡流的变化^[24]。H. Tsuboi等人采用棱边有限元法求解了 27 号电磁场基准问题(Team Workshops problem 27)的时域响应^[25]。L. Xuan等采用无网格Galerkin方法(Element Free Galerkin Method)实现了对脉冲涡流的计算^[26]。

国内在脉冲涡流理论计算方面也有一些研究成果。文献【27】通过了在非涡流区引入标量位的途径,构造了功率积分和能量积分,从而证明了含有磁感应强度法向分量边界条件的涡流场定解问题有唯一解,并且求解出在单脉冲电流源的激励下半无限大的导体中的瞬态涡流密度的解析解。文献【28】应用时域有限元

-边界元耦合法 (T-FEBEM) 研究了有限厚平板导体中含有窄裂缝时的瞬态脉冲涡流场问题。

总得来说, 随着大型计算机的出现和发展, 各种数值计算方法相继被应用到脉冲涡流的理论研究和分析中。具有代表性的数值计算方法主要有以下三种: 时域有限差分法 (Finite Difference Time Domain或FDTD)、有限单元法 (Finite Element Method或FEM) 和边界元法 (Boundary Element Method或BEM)。时域有限差分法是以差分原理为基础的一种数值方法, 它把电磁场连续场域内的问题变为离散系统的问题, 即用各离散点上的数值解来逼近连续场域内的真实解。由于时域有限差分法具有简单、直观的特点, 以及近年来对该算法的改进和边界问题的解决, 这一方法也被应用到脉冲涡流的理论计算中来。有限单元法是以变分原理和剖分插值为基础的一种数值计算方法。较早的时候, 有限元法以变分原理为基础, 广泛地应用于拉普拉斯方程和泊松方程所描述的各类物理场中。此后证明, 应用加权余量法中的伽辽金法或最小二乘法同样可以得到有限元方程, 因此有限元法可以用于任何微分方程所描述的各类物理场。边界元法是把边界积分法与有限元法的离散方式组合起来的方法。这一方法将描述场的微分方程通过加权余量法归结为边界上的积分方程, 然后把这个积分方程进行边界分割和插值, 从而求出近似解^[29]。

1.3.3 脉冲涡流缺陷识别方法的研究现状

从检测得到的信号中提取有用的特征量, 对缺陷进行定量定性的识别, 是脉冲涡流检测技术应用于航空维修领域的主要目的之一。国内外的研究人员对缺陷的分类识别进行了诸多研究。

A. Sophian等人提出了基于主成分分析 (Principal Component) 提取脉冲涡流特征量对缺陷进行分类识别的方法。主成分分析是指将一组变量通过线性变换转换成一组新的变量。这些新变量称为主成分。该方法保留了原始数据的大部分信息又降低了原始数据的维数。他们将脉冲涡流响应信号作小波变换得到小波系数, 对这些小波系数做主成分分析提取显著的特征量进行缺陷分类, 结果如图 1.3.1 所示^[30]。该方法的不足之处是分类结果容易受提离的影响。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库