

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 23120061152505

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

吸波材料厚度与复电磁参数无损检测方案
研究

Study on Thickness and Complex Electromagnetic
Parameters Non-destructive Measurement of Absorbing
Materials

祁 放

指导教师姓名: 游佰强 教授

专业名称: 电路与系统

论文提交日期: 2009 年 06 月

论文答辩时间: 2009 年 06 月

学位授予日期:

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2009 年 06 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

近年来,吸波材料在越来越多的领域得到了广泛应用,其性能测试技术也逐渐成为研究的热点与焦点。吸波材料的尺寸参数中最重要的是几何厚度,在研发、涂装、施工和质量检验过程中,厚度是一项重要的控制指标。电磁波在材料中的传播特性则主要由复磁导率及复介电常数来表征,它们决定了材料对电磁波的反射系数,而反射系数直接反映了材料的吸波性能。因此精确测定吸波材料的厚度及电磁参数,对于仿真计算、优化设计和性能评估起着决定性的作用。

本文在对相关技术作了大量跟踪调研后,总结了各种适合于吸波材料无损检测的较为成熟的测试技术的原理、应用范围及优缺点。针对在厚度及电磁参数同步检测研究方向上的空白,提出了利用涂层电容/电感法原理,增加附加的调制或采用多点探测手段,实现多个待测量同时检测的思路,并基于此思路建立了双电极单层膜检测模型。为了推导待测量与电容、电感之间的关系方程,通过数值法有限元仿真及解析法保角变换两种手段分析了模型的电磁场结构。

作为重点,文中利用有限元仿真直观地模拟了模型的静电场和静磁场结构,并得出电容、电感与模型尺寸参数及材料性质之间的关系。通过数据拟合得出特定测试条件下的近似经验公式,为解析法推导的理论公式验证提供了对比的依据。利用两次保角变换将复杂的模型求解区域转换成无边缘效应的四角形区域,大大简化了分析过程,并直接推导出精确的近似解析式,反映待测量与各物理参量间的变化关系。本文还采用FORTRAN语言编写了最优化算法程序求解两种方法推导的非线性方程组,并通过反演对比论证了公式的可信度。以此为基础结合阻抗分析仪测试技术建立了一套较为完善的检测方案,理论测试精度可达到0.8%以上。此外,为了实现多层吸波材料的各层参数的同步检测,本文结合电磁波在有耗分层媒质中的反射与透射理论,提出了改进自由空间法的检测方案。

本文提出的测试方案实现了吸波材料厚度与电磁参数的同步检测,方案难度主要体现在模型推导及算法软件的实现。硬件结构简单,操作简便,对材料无损且测试精度较高,具有很强的创新性、实用性和推广性。

关键词: 吸波材料; 厚度; 复电磁参数; 有限元法; 保角变换法

Abstract

In recent years, absorbing material has been widely used in more and more fields. Its performance measurement technology has become a hot spot and the focus of the material testing study gradually. The most important size parameter in absorbing materials is the geometric thickness. It is an important control index in the research, painting, construction and quality inspection process. The electromagnetic wave propagation characteristic in materials is mainly characterized by its relative complex permittivity and complex permeability, which determines the reflection coefficient of electromagnetic waves of the materials. And the absorbing property of the material is directly determined by the reflection coefficient. Thus accurately measuring the thickness and the electromagnetic parameters of absorbing material has played a decisive role in simulation, optimization design and performance evaluation.

After doing a lot of track and research with related technology, we've made a summary of the theory, applications and advantages or disadvantages about a variety of mature non-destructive testing techniques which is suitable for absorbing materials. Aim at the research blank on synchronous measurement of thickness and electromagnetic parameters, we put forward an idea which based on coating capacitance and inductance measurement principle. With additional modulation or multi-point testing means, several measured values could be tested synchronously. Based on this idea we've established a dual-electrode monolayer detection model. In order to derive the relationship equations among capacitance, inductance and measured values, we analyzed the electromagnetic structure of the model by the finite element method of numerical simulation and conformal transformation by analytical method.

As the key point of this thesis, we used finite element simulation model to simulate the static electric field and static magnetic field structure, and come to the relationship among capacitance, inductance, the model size parameters and material properties. Then we obtain the approximate empirical formula through data fitting on specific testing conditions. It provides a basis for comparison to verify the theoretical formula by the analytical method. We turn the complex models into the square region

without edge effects by using conformal transformation two times. It greatly simplifies the analysis process, and derived the accurate approximate analytical equation directly. It shows the changing relationships between the physical parameters and measured values. The nonlinear equations derived in two ways are solved by optimization algorithm written in FORTRAN language. We demonstrate the credibility of the formula through the inversion of contrast. A relatively perfect testing program with impedance analyzer test technology could be set up based on it, and the theoretical accuracy of it can be achieved more than 0.8%. In addition, in order to achieve the simultaneous measurement of all levels of the parameters of multi-layer absorbing materials, we used the reflection and transmission theory of electromagnetic wave in lossy layered media and put forward a measurement by improved the free-space method.

The paper work realizes the synchronous detection of the thickness and electromagnetic parameters of the absorbing materials. The difficulty is mainly embodied in derivation of the model and the realization of software algorithms. The hardware structure is simple and easy to operate, and it is a non-destructive measurement to materials with high testing accuracy. The measurement is highly innovative, practical and propagable.

Key words: absorbing material; thickness; complex electromagnetic parameters; finite element method; conformal transformation

目 录	
第一章 绪论	1
1.1 课题背景及研究意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 主要工作及内容安排.....	5
1.4 论文创新点.....	6
第二章 吸波材料主要参数的测试方法	7
2.1 厚度测量.....	7
2.1.1 桥式电路法.....	7
2.1.2 电容法.....	8
2.2 电磁参数的测量.....	9
2.2.1 吸波材料的电磁特性.....	10
2.2.2 谐振腔法.....	11
2.2.3 网络参数法.....	11
2.3 测试仪器.....	16
2.3.1 矢量网络分析仪.....	17
2.3.1 阻抗分析仪.....	19
2.4 本章小结.....	21
第三章 涂层电容/电感法原理数值法分析	23
3.1 有限元法基本原理.....	23
3.2 平板电容模型边缘效应仿真.....	24
3.3 双电极单层膜结构有限元仿真.....	28
3.3.1 静电场仿真分析.....	28
3.3.2 静磁场仿真分析.....	32
3.4 拟合经验公式.....	37
3.5 本章小结.....	39
第四章 涂层电容法/电感法原理解析法分析	41
4.1 保角变换理论.....	41
4.1.1 解析函数的保角变换性质.....	42

4.1.2 应用保角变换时的几条重要推论.....	42
4.1.3 许瓦兹—克列斯多菲变换.....	43
4.2 单电极单层膜模型解析法分析.....	45
4.2.1 分离变量法分析.....	45
4.2.2 保角变换法分析.....	46
4.2.3 近似电容计算公式分析对比.....	48
4.3 双电极单层膜结构解析法分析.....	50
4.3.1 两电极加反向电压静电场分析.....	50
4.3.2 两电极加同向电压静电场分析.....	52
4.3.3 静磁场分析.....	59
4.4 非线性方程组计算结果.....	62
4.4.1 最优化算法.....	62
4.4.2 计算结果分析.....	63
4.5 检测实验系统构建.....	68
4.6 本章小结.....	70
第五章 多层吸波材料电磁参数与厚度的测试方案.....	71
5.1 电磁波在介质分界面上的反射与折射.....	71
5.2 电磁波在多层介质中的损耗与反射.....	74
5.3 多层吸波材料厚度与复电磁参数检测公式.....	76
5.4 多层吸波材料的等效电磁参数.....	77
5.5 本章小结.....	79
第六章 总结与展望.....	80
参考文献.....	83
攻读学位期间申请的专利.....	88
致 谢.....	89

Contents

Chapter 1 Forward	1
1.1 Background of the subject and its significance.....	1
1.2 The actuality and achievements at home and abroad.....	2
1.3 The main work and content arrangements of the thesis.....	5
1.4 Innovative points of the thesis	6
Chapter 2 Main parameters measurements of absorbing materials.....	7
2.1 Thickness testing technology	7
2.1.1 Bridge circuit method	7
2.1.2 Capacitance method.....	8
2.2 Electromagnetic parameters testing technology	9
2.2.1 Electromagnetic properties of absorbing materials.....	10
2.2.2 Cavity method.....	11
2.2.3 Network parameter method.....	11
2.3 Testing equipment.....	16
2.3.1 Vector Network Analyzer.....	17
2.3.1 Impedance Analyzer.....	19
2.4 Brief summary	21
Chapter 3 Numerical analysis of coating capacitance/inductance measurement	23
3.1 Principle of finite element method.....	23
3.2 Simulation of the plate capacitor model's edge effects.....	24
3.3 FEM simulation of dual-electrode monolayer detection model	28
3.3.1 Simulation and analysis of static electric field	28
3.3.2 Simulation and analysis of static magnetic field.....	32
3.4 Data fitting	37
3.5 Brief summary	39
Chapter 4 Analytical analysis of coating capacitance/inductance measurement.	41
4.1 Conformal transformation theory	41
4.1.1 Conformal transformation characteries of analytic functions.....	42

4.1.2	Some important inferences of conformal transformation	42
4.1.3	Schwarz-Christoffel transformation.....	43
4.2	Analytical analysis of Single-Electrode single-layer membrane model	45
4.2.1	Analysis by separation of variables method	45
4.2.2	Analysis by conformal transformation.....	46
4.2.3	Comparison of approximate formula for calculating capacitance	48
4.3	Analytical analysis of dual-electrode monolayer detection model	50
4.3.1	Electrostatic analysis of imposing reverse voltage on two electrodes..	50
4.3.2	Electrostatic analysis of imposing same voltage on two electrodes	52
4.3.3	Analysis with static magnetic field	59
4.4	The results of nonlinear equations	62
4.4.1	Optimization algorithm.....	62
4.4.2	Analysis of calculation results	63
4.5	Establishment of experimental detection System	68
4.6	Brief summary	70
Chapter 5	Parameters measurement of multi-absorbing materials.....	71
5.1	Reflection and transmission of electromagnetic wave in layered media	71
5.2	Loss and reflection of Electromagnetic waves in multi-media.....	74
5.3	Parameters detection formula of Multi-absorbing material	76
5.4	Equivalent electromagnetic parameters of Multi-layer absorbing material....	77
5.5	Brief summary	79
Chapter 6	Conclusion and expectation	80
References	83
The papers published during graduate student	88
Acknowledgements	89

第一章 绪论

1.1 课题背景及研究意义

吸波材料是指能吸收并衰减入射的电磁波,并将其电磁能转换成热能耗散掉或使电磁波因干涉而消失的一类材料。吸波材料最早应用于军事目的,称为“隐身材料”^[1]。现代战争中,由于遥感和探测技术飞速发展,各国防空和反导弹系统的能力日益增强,作战飞机、巡航导弹、战略导弹、舰艇和坦克等武器系统受到越来越严重的威胁,大力发展和应用隐身技术,提高现代武器系统的突防和生存能力,提高总体作战效能,已成为各国军事发展的重要组成部分。作为当代三大军事技术革新之一,隐身技术已经成为海、陆、空、天、电磁五位一体的立体化现代化战争中最重要、最有效的突防战术技术措施,是提高武器系统生存、突防和纵深打击能力不可或缺的手段。隐身材料作为隐身技术的核心已成为各国研究的重中之重,备受世界各军事大国的高度重视^{[2][3]}。

如今吸波材料的应用已远远超出军事隐形与反隐形、对抗和反对抗的范围,更广泛地应用在人体安全防护、微波暗室消除设备、通讯及导航系统的电磁干扰、安全信息保密、改善整机性能、提高信噪比、电磁兼容以及波导或同轴吸收元件等许多方面^[4]。尤其随着电子技术的飞速发展,环境中由电磁场所造成的电磁环境污染也越来越强。经过30年的信息化过程,今天的电磁能量密度增加了420倍,以如此递增的速度增长,电磁环境的复杂性及能量密度的巨大程度可想而知。我国进入经济高速发展的21世纪,各种电子设备的使用数量每年成倍增长,随之也就出现了电磁环境污染和电磁干扰严重等问题^[5]。所以,尽快扩大电磁波屏蔽、吸收材料的产业规模对于军用和民用都有极大的实用价值。美、俄、欧洲各国及日本在这一领域都取得了一定的进展,国内以航空工业总公司及其所属研究所为先导已掀起了吸波材料研究工作的热潮,有多家单位致力于该课题研究并取得阶段性成果,但由于起步较晚,我国尚未形成具有规模性的吸波材料产业。因此,吸收材料的相关研究、产业化和市场化具有重大的现实意义,应增加投入力度,迅速形成较大的规模^[6]。

吸波材料的尺寸参数中最重要的是几何厚度,在研发、涂装、施工和质量检

验过程中,厚度是一项重要的控制指标。电磁波在材料中的传播特性则主要由复磁导率及复介电常数来表征,它们决定了材料对电磁波的反射系数,而反射系数直接反映了材料吸波性能。在吸波材料的研制和生产过程中,精确测定材料的厚度及电磁参数,才可以进行仿真计算、优化设计和性能评估。材料一旦设计和制造出来,必须对其进行测试鉴定,以确定是否达到设计指标要求^[7]。因此,准确地测试吸波材料的厚度及电磁参数既是一项基础工作,又是一项十分重要的研究工作,在材料科学、生物电磁学、隐身技术、微波电路设计等电磁场和微波工程技术的实践领域一直扮演着重要角色。目前吸波材料的设计主要建立在材料的复磁导率,复介电常数和厚度上,为了展宽吸收频带,降低重量,主要采用分层优化设计,尽可能发挥现有吸收剂性能。于是在研制高性能雷达吸波材料的同时,对吸波材料的性能测试也提出了更高的要求,可见对其进行深入研究具有重要的参考价值和实用意义。

1.2 国内外研究现状

当前国内外研究热点大多集中在吸波材料的理论研究、制备工艺及性能测试三个方面。尤其在前两个领域,通过研究制备密度小、吸波性能强的吸波剂,覆盖厘米波、毫米波、红外、可见光等波段的各种新型吸波材料相继问世^[8~11],而吸波材料的性能测试方法历来都是难点与焦点,有效地测试、调控吸波材料的厚度与电磁参数,对于材料的设计与研发具有决定性作用。

迄今为止在实验室中常用的测厚方法如破坏性针刺法、千分尺法、称重法和对比法等存在着操作复杂,损耗大,精确度低等问题,均无法在实际工程中应用^[12]。市面上通用的无损测厚方法(如反射式电涡流法、超声波脉冲回波法、变磁阻法)和设备都是针对非磁性薄膜材料(如非磁性金属镀层、漆膜、氧化膜、塑胶涂层等)。然而,为了达到良好的吸波效果以及宽频电性能设计的要求,大多数吸波材料为多层复杂结构设计,有的层没有导磁性,有的层则添加大量的铁磁性微粉具有导磁性且对电磁波有强烈的吸收特性,其特殊的内部结构特点使得这三种测厚仪无论是在测量原理上,还是量程范围上都满足不了对吸波涂层厚度精确测量的要求^[13~15]。利用光学方法(如 β 粒子反射法、x射线反射法、红外线反射法等)可以同时检测材料的折射率及厚度,测试范围大,但是存在放射性且

涉及到使用一些专门的精密光学仪器^[16-17]。目前较为可行且简便的测厚方法有电阻测量法、电容测量法及桥式电路法。桥式电路法是一种简便、实时、无损的测试方法,在国外已得到验证和使用,但由于涉及军事秘密,无法得到更多相关信息,离实用还有相当距离,相关系统设备还需进行小型化改造^[18]。电容测试法属于间接测量法,成本低、操作简单,既安全又便于安装调试,是目前使用最广的吸波材料测厚技术。其原理是将电容器作为传感器,将被测物放在极板间,电容值随厚度的变化而变化,通过检测电容值换算出材料的厚度值^[19]。2002年,IEC专门增加了一个附件,在电容传感器测厚法基础上,推荐使用变间隙三电极测量技术。由于IEC标准中并未对技术条件和参数做明确规定,在推行国家标准之前这方面的研究是电容测量法的焦点^[20]。

材料电磁参数测试技术是一门交叉学科,它涉及材料学、无线电测试学等领域。早在四十年代,国内已经展开了对微波材料介电常数和磁导率的测试研究,但是由于材料学和测试技术的发展限制,进展比较缓慢。直到九十年代以后,国内很多科研机构 and 大学才开始着手于该领域的研究,各种测试方法和测试系统纷纷涌出^[21]。

首先,按激励信号的不同,材料电磁参数测试方法可以分为频域方法、时域方法和色散傅立叶变换波谱方法三大类。频域方法以周期函数的正弦波为激励信号,时域方法^[22-23]以阶跃函数的脉冲波为激励信号,色散傅立叶变换波谱方法^[24-25]的激励信号来自白噪声源。在射频和微波范围,频域方法的测量精度高于时域方法,而色散傅立叶变换波谱法只能用于远红外亚毫米波段,因此在射频和微波范围测量复介电常数和复磁导率主要是采用频域的方法。按使用频率范围的不同,各种频域测量方法可大致分为射频测量方法和微波测量方法两种,前者采用集总参数回路,后者主要使用分布参数系统。与射频测量方法不同,许多微波测量方法能同时确定材料的微波复介电常数和复磁导率,主要包括传输/反射法^{[22][26-27]}、探头法^[28]、谐振腔法^[29]、自由空间法^[30]及使用多个终端的单端口传输线法^[31]等,如图1-1所示。

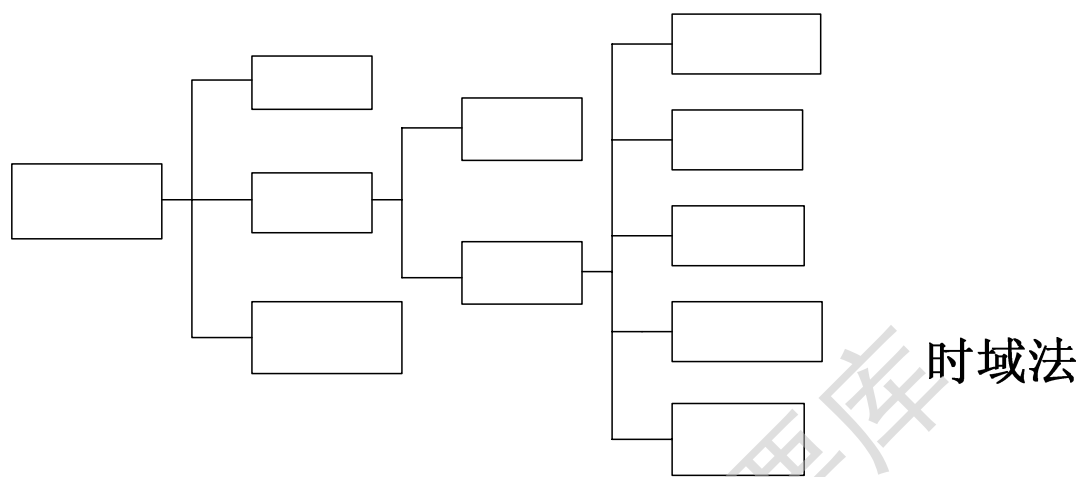


图1-1 材料电磁参数测试方法分类（按激励信号）

电磁参数
测试方法

时域法

频域法

此外，在微波及毫米波波段，材料的电磁参数测试方法按测试原理又可分为网络参数法和谐振腔法两大类。一般用于低损耗介质材料电磁参数测量的谐振腔法是将材料样品放入谐振腔中，根据放入前后其谐振频率和Q值的变化来确定样品的复介电常数和复磁导率。随着矢量网络分析仪技术的发展，网络参数法测量材料电磁参数得到了广泛应用。这类方法是把材料样品及其传感器等效为单端口或双端口网络，利用时域法、传输/反射法、多状态法、多厚度法、自由空间法等测量该网络的散射参数或复反射系数，据此计算待测材料的复介电常数及复磁导率，网络参数法主要用于高损耗材料微波复数电磁参数的测量，如图1-2所示。

色散傅里叶
变换波谱法

下文中将主要按这一分类方法详细叙述各种电磁参数测试方法的测试原理。

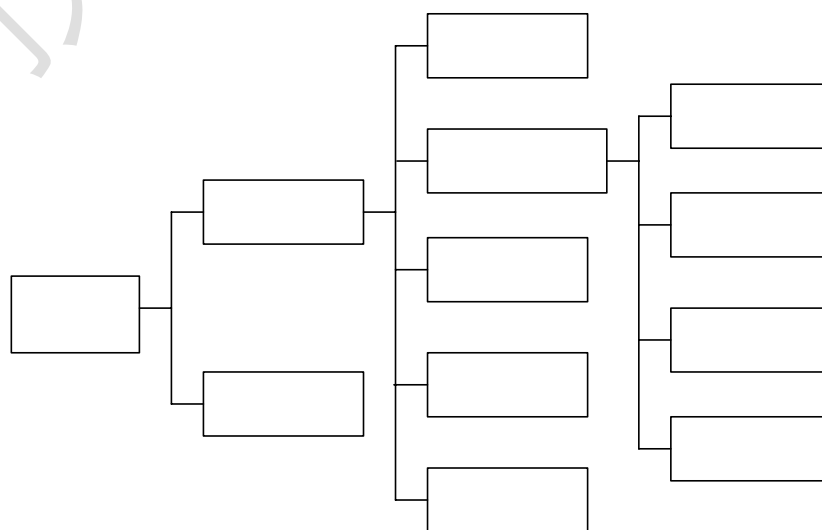


图 1-2 材料电磁参数测试方法分类（按测试原理）

以上可检索到的各种检测方法均为单独运用于厚度或者电磁参数检测的较为成熟的方案。然而在吸波材料的实际应用中，厚度和电磁参数往往同时为未知量，这就需要对上述方案进行改进，或是变通思路，结合先进的检测仪器，避开工作波段，设计一些简单、经济、有效、无损的测试方案，这将是本文的研究重点。国内外在这方面的研究还未见专门报道，因此研究同时检测吸波材料厚度及电磁参数的无损检测方案具有很强的创新性、实用性和推广性。

1.3 主要工作及内容安排

为了实现吸波材料厚度及复电磁参数的同步无损检测，本文在作了大量相关研究工作的调研后，提出了基于涂层电容/电感法的双电极单层膜检测模型，并通过数值法有限元仿真及解析法保角变换分析了模型的电磁场结构，推导了检测公式。针对多层吸波材料的各层参数检测，提出了改进自由空间法的检测理论方案。论文一共分为六个部分，具体内容如下：

1. 第一章主要介绍了吸波材料的应用范围和厚度及电磁参数检测的研究背景，按照不同的分类方法概述了各种现有检测技术和研究热点，体现了本文的研究意义。
2. 第二章讨论了目前各种较为成熟的厚度和电磁参数检测技术的原理、应用范围及优缺点，并对两种核心测试仪器做了调研。从中吸取了一些可借鉴的检测思路，从而确定本文采用的测试方案。
3. 第三章着重对本文采用的双电极单层膜检测模型进行了有限元仿真，直观地模拟了模型电场和磁场的场结构，并得出了电容、电感与模型尺寸参数及材料性质之间的关系。通过数据拟合得到了可用于检测的近似经验公式，为解析法推导的理论公式验证提供了对比的依据。
4. 第四章是本文的重点，主要利用保角变换法对双电极单层膜模型进行分析，讨论了对两电极施加极性相反电压时的模型电容计算公式。对于加同向电压的模型结构，通过两次保角变换将复杂的求解区域转换成无边缘效应的四角形区域，推导了求解厚度及复电磁参数的非线性方程组，用FORTRAN语言编写最优化算法程序计算，并通过反演及与数值法计算结果对比论证了公式的正确性。最后总结了基于本文提出的检测模型结构的实验系统的组成及操

作流程。

5. 第五章主要讨论了电磁波以任意角度入射到分层吸波材料的反射系数与透射系数公式的推导，并以此为基础结合自由空间法提出了一种多层吸波材料厚度及复电磁参数同步检测的测试方案，可以实现宽频带扫频测试。
6. 第六章对全文进行了总结与展望，讨论了已做研究工作的不足之处，指出了下一步的研究工作。

1.4 论文创新点

1. 提出了利用涂层电容/电感法原理，增加附加的调制和多点探测手段，实现多个待测量同时检测的思路。
2. 建立了双电极单层膜结构的检测模型，加上适当的激励，可将该模型视为一个电容器或电感器，从而建立厚度及复电磁参数与电容及电感之间的关系方程。
3. 将阻抗分析仪检测技术应用于吸波材料无损检测。
4. 提出了改进自由空间法的理论公式，实现多层吸波材料的各层参数的同步检测。

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.

厦门大学博硕士学位论文摘要库