

学校编码: 10384

分类号__密级__

学号: 32020101152688

UDC__

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

脉冲涡流检测的三维有限元仿真研究

Studies on Three Dimensional Finite Element Modeling
of Pulsed Eddy Current Testing

罗敏芳

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: 2013 年 6 月

论文答辩日期: 2013 年 6 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2013 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): 罗敏芳

2013年6月7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）：**罗敏芳**

2013年6月7日

摘要

脉冲涡流检测技术是一种新型的涡流检测技术。由于它的激励信号频谱宽广，并且不同频率分量对应不同的趋肤深度，使检测信号包含丰富的材料内部深度方向的信息，在航空航天、石油化工、核能电力等领域有着广阔的应用前景。因此对脉冲涡流检测技术的研究有着重要的意义。

对脉冲涡流检测的仿真可以指导脉冲涡流检测技术的研究。相对于实验研究，仿真所需的设备简单，研究成本低，研究过程更灵活，同时可以避免实验研究中不确定因素带来的干扰。基于这一点，本文以电磁场理论为基础，建立了脉冲涡流检测的仿真模型，应用有限元分析方法，使用 FORTRAN 语言编写程序，实现了含有磁芯探头扫描的脉冲涡流检测的三维仿真。通过与实验、理论解及二维轴对称仿真的结果对比，验证了三维仿真程序的可靠性。

在计算脉冲涡流检测的时域瞬态响应时，本文采用了傅里叶变换法。然而脉冲信号的频率成分非常多，传统的傅里叶变换法要对所有频率分量逐个进行计算，这对于求解规模庞大的三维有限元模型来说，计算量将是巨大的，需要消耗的计算时间也是不可接受的。本文分析了激励幅值不变的情况下，响应与激励频率的关系。在此基础上，采用插值策略，只需选取方波频率成分中的少数分量进行计算，其它分量的响应由插值快速得到。在保证计算精度的前提下，大大缩短了计算时间。

本文采用了分解区域算法代替传统的整体区域上的直接求解，不仅减小了网格规模，降低了计算机内存消耗，还在模拟磁芯探头扫描检测的问题中，避免了对模型重新划分网格。相应地，对于同一频率分量下的不同探头位置，刚度矩阵的产生和预处理只需进行一次。这样减少了工作量，提高了仿真效率。

关键词：脉冲涡流检测； 三维有限元； 傅里叶变换法

Abstract

Pulsed eddy current testing (PECT) is one of the new techniques of eddy current testing (ECT). Thanks to the large amount of frequency components, the response signal of PECT contains much richer information about defect and material properties along the depth direction than conventional ECT. Therefore, PECT will play an important role in the maintenance of aircrafts, nuclear power plants, oil and gas transmission tubes and so on. Hence studies on PECT are of much significance.

Numerical simulation is a very useful, flexible and low-cost method for better understanding of PECT technology. This thesis focuses on three-dimensional (3D) finite element modeling of PECT with ferrite-core probe scanning. The transient signal of PECT is calculated using in-house developed FORTRAN program. Validation of the model is presented.

The thesis utilizes the Fourier transform (FT) method to compute the transient response signal of PECT. As it takes time to compute each frequency component of pulsed excitation for the 3D model, obtaining full response signal will cost prohibitively long time. A faster approach combines the FT method with an interpolation strategy. Using the strategy, only a few out of all the frequency components are to be calculated. The responses of the rest ones can be obtained quickly by interpolation. Thus, computation time reduces a lot without sacrificing computation accuracy.

Domain decomposition method is adopted in the modeling of PECT with ferrite-core probe. The solution domain is decomposed into subdomain of ferrite core and subdomain of test sample. Mesh generation is performed on each subdomain, which reduces mesh size and memory consumption of computer. Even more, remeshing is avoided when changing probe position. Accordingly, when computing signal of each frequency component, the generation and preconditioning of stiffness matrices for different probe positions are done only once. Therefore, the simulation efficiency is greatly improved.

Key words: Pulsed eddy current testing; three-dimensional finite element modeling; Fourier transform method

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目录

摘要.....	I
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 无损检测概述	3
1.2.1 无损检测技术发展现状.....	3
1.2.2 无损检测技术种类.....	3
1.3 涡流检测技术	4
1.3.1 涡流检测技术原理.....	5
1.3.2 趋肤效应.....	5
1.3.3 涡流检测的特点.....	7
1.3.4 涡流检测新技术.....	7
1.4 脉冲涡流检测技术	10
1.4.1 脉冲涡流检测技术的研究现状.....	10
1.4.2 脉冲涡流缺陷识别方法的研究进展.....	13
1.5 脉冲涡流检测仿真的研究现状	15
1.5.1 脉冲涡流理论计算的研究进展.....	15
1.5.2 探头移动的仿真研究.....	18
1.6 本文主要研究工作	19
第二章 脉冲涡流检测技术的理论基础	21
2.1 脉冲涡流的作用原理	21
2.1.1 脉冲涡流检测系统.....	21
2.1.2 脉冲涡流的作用原理.....	21
2.1.3 脉冲涡流的趋肤效应.....	23
2.2 涡流检测的控制方程	23
2.2.1 麦克斯韦方程组.....	24
2.2.2 涡流分析的 $A, V-A$ 表述	25

2.2.3 分解区域算法及 $A_r, V-A_r$ 表述.....	29
第三章 脉冲涡流检测的有限元模型.....	33
3.1 有限元法概述.....	33
3.2 形函数的推导.....	35
3.2.1 三维有限元形函数.....	35
3.2.2 三维无限单元映射.....	39
3.3 有限元仿真模型及网格划分.....	43
3.4 数值计算.....	47
3.4.1 傅里叶变换法的实现.....	48
3.4.2 频域控制方程与等效积分形式.....	51
3.4.3 弱式的转化.....	51
3.4.4 系统方程.....	55
3.4.5 边界条件的实现.....	57
第四章 计算结果与实验验证.....	59
4.1 探头固定单频激励情况.....	59
4.2 探头固定脉冲激励情况.....	64
4.2.1 空气芯探头脉冲涡流检测的仿真.....	64
4.2.2 磁芯探头脉冲涡流检测的仿真.....	71
4.2.3 磁芯探头检测模型的实验验证.....	76
4.3 脉冲激励探头扫描情况.....	78
第五章 总结与展望.....	83
5.1 本文总结.....	83
5.2 展望.....	84
参考文献.....	85
攻读硕士期间发表的论文.....	91
致谢.....	92

Table of contents

Abstract.....	II
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Background and significance	1
1.2 Overview of nondestructive testing (NDT)	3
1.2.1 Status of NDT	3
1.2.2 Categories of NDT techniques.....	3
1.3 Eddy current testing (ECT) technique.....	4
1.3.1 Principle of ECT	5
1.3.2 Skin effect	5
1.3.3 Features of ECT	7
1.3.4 New techniques of ECT	7
1.4 Pulsed eddy current testing (PECT) technique.....	10
1.4.1 Research status of PECT.....	10
1.4.2 Advances in defect characterization of PECT	13
1.5 Research status of PECT modeling	15
1.5.1 Advances in PECT computation	15
1.5.2 Studies on PECT modeling with probe scanning.....	18
1.6 Main tasks of the thesis.....	19
Chapter 2 Theoretical basis of PECT	21
2.1 Principle of PECT	21
2.1.1 System of PECT.....	21
2.1.2 Principle of PECT	21
2.1.3 Skin effect of PECT	23
2.2 Differential governing equations of ECT	23
2.2.1 Maxwell's equations	24
2.2.2 A, V - A formulation of eddy current problem.....	25
2.2.3 Domain decomposition method and A_r, V - A_r formulation	29

Chapter 3 Finite element (FE) modeling of PECT	33
3.1 Overview of FE method.....	33
3.2 Derivation of shape functions	35
3.2.1 Shape functions of three-dimensional (3D) FEM.....	35
3.2.2 Mapping of 3D infinite elements	39
3.3 FE model and meshing	43
3.4 Numerical computation	47
3.4.1 Implementation of Fourier transform (FT) method	48
3.4.2 Governing equations in frequency domain and the weak form	51
3.4.3 Transformation of weak form	51
3.4.4 System equations	55
3.4.5 Imposition of boundary conditions	57
Chapter 4 Results and validation	59
4.1 Case of sinusoidal ECT with static probe	59
4.2 Case of PECT with static probe.....	64
4.2.1 Modeling of PECT with air-core probe	64
4.2.2 Modeling of PECT with ferrite-core probe.....	71
4.2.3 Experimental validation of PECT with ferrite-core probe.....	76
4.3 Case of PECT with ferrite-core probe scanning	78
Chapter 5 Summary and prospect	83
5.1 Summary of the thesis	83
5.2 Future work.....	84
References	85
Appendix.....	91
Acknowledgement.....	92

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

随着现代工业的飞速发展，高温、高压、高速和高负载已经成为现代工业化的新要求，加上社会安全意识与日俱增，迫使机械制造、石油化工、核能电力、航空航天等行业不断提高对产品质量和设备运行安全的要求。无损检测由于具有不破坏试件不改变试件使用性能，可以进行百分之百检测等特点，在工程应用和科学研究领域都得到很大的重视并迅速发展^[1]。目前，无损检测发展现状已然成为衡量一个国家工业发展水平的重要因素，尤其在航空领域，可以毫不夸张地说，无损检测决定了飞行器的安危。

物理与材料科学的发展，不断完善着无损检测技术的理论与物质基础。同时，电子技术，尤其是计算机技术不断渗透到无损检测领域，也进一步推动了无损检测技术的发展。无损检测技术不断渗入各个领域，与其他基础学科的综合应用也日益广泛，已经衍生出几十种无损检测方法。涡流检测 (Eddy current testing, ECT) 是其中一项重要的检测技术，它以电磁感应为基础，通过测量线圈阻抗或者感应电压的变化来反映材料属性以及缺陷的性质。它不仅能够检测导体材料中的缺陷，测量材料的电导率、磁导率等参数，还能用以测量金属厚度以及金属基材上涂层或镀层厚度。涡流检测凭借其检测速度快、使用成本低、操作方便、易于实现自动化等特点，在机械、航空等许多工业部门得到了十分广泛的应用。

然而，传统的涡流检测技术在实际应用中也遇到一些问题。例如，探头的提离效应引起的干扰容易覆盖缺陷信号，使得难以从检测信号中分析出缺陷信息。针对这一问题，研究人员采用含有两个接收线圈的差分式探头，很好地克服了提离效应。再如，在核工业、石油化工管道的检测中，支撑件会带来很强的干扰，而传统的涡流检测难以抑制这些干扰因素。为了解决这一问题，发展出了多频涡流检测技术，它采用至少三种不同频率的激励在被检工件中产生涡流，通过对多个频率激励下的检测信号进行综合分析，有效地消除了提离以及支撑件引起的干扰。但是采用多频涡流检测，在每个检测位置都需要使用至少三种不同频率的激励分别进行检测，对于探头扫描检测的情况，检测时间将大大增加^[2]。而且由于受到趋肤效应的影响，传统的涡流检测技术所能检测到的深度很有限，往往仅适

用于表面和近表面缺陷的检测。如果需要检测下表面缺陷,就不得不降低激励频率,以牺牲表面检测灵敏度为代价。

为了满足抗干扰性强、检测速度快以及能获得深度方向缺陷信息的检测要求,脉冲涡流检测 (Pulsed eddy current testing, PECT) 技术应运而生。脉冲涡流检测技术采用脉冲信号作为激励,它含有无穷的频率分量,利用它进行检测时相当于在一次扫描中就实现了大量频率的同时检测。其中的不同频率分量对应不同的涡流渗透深度,这使得检测信号含有丰富的深度方向的信息,而且其检测成本低。由于这些特点,脉冲涡流检测技术成为了目前无损检测领域研究的热点,在科研单位和相关工业部门越来越受到重视。

在众多研究方法中,有限元仿真方法 (Finite Element Method, FEM) 是一种非常有效的脉冲涡流检测研究手段。其研究成本低,研究设备简单,可以很容易地尝试各种不同的模型而无需加工物理实体,也可以很方便地改变各种检测参数和检测环境而无需实际调整物理状态。有限元仿真对帮助理解脉冲涡流检测技术的原理,研究检测性能,分析检测信号以及改进检测方法非常有效,在检测探头的设计及尺寸优化、设备设计与制造等方面已经得到广泛应用,成为脉冲涡流检测研究的主要方法。

国内外同行开展了脉冲涡流检测的二维轴对称和三维有限元分析。二维轴对称模型适用于一些简单的、具有轴对称结构的仿真问题。它具有求解规模小,计算速度快等特点。但是实际的样品结构和缺陷形状往往比较复杂,不能简化为轴对称问题。而且,实际检测中探头一般是在样品表面上扫描的,这会破坏模型原本可能具有的轴对称性。这些情况下就只能进行三维分析。然而三维有限元仿真还存在较多的困难。三维模型的网格规模和待求解量的数目都较二维轴对称模型庞大,因此它对计算机硬件配置要求较高,且计算时间较二维轴对称模型长得多。更严重的问题是,对于需要模拟探头扫描的问题,传统的研究中大多采用对不同探头位置重新划分网格,完全重新进行求解的办法,但这无疑会加大仿真难度,降低仿真效率。还有,求解脉冲涡流检测的瞬态响应时,无论是采用时间步进法还是傅里叶变换法,需要计算的时间点数或频率分量个数都非常巨大,这对求解速度本来就慢的三维模型来说,仿真耗时将是不可接受的。因此,对脉冲涡流检测的三维有限元仿真研究,还有待进一步突破。本文的研究就是致力于解决这些问题。

1.2 无损检测概述

无损检测技术是指在不损伤被检测对象的条件下,利用材料内部结构缺陷存在所引起的对热、声、光、电、磁等反应的变化,来探测各种工程材料、零部件、结构件等的内部和表面缺陷,并对缺陷的类型、数量、形状、尺寸及其分布做出判断和评价。无损检测技术具有:(1)不会对构件造成任何损伤,从而保证了产品原有的使用性能;(2)提供了查找缺陷的一种有效方法;(3)能够对产品质量实施监控,提高产品质量降低生产成本;(4)能够及时发现产品失效,避免引起灾难性后果;(5)应用范围广阔等特点,因而在工业界受到普遍重视,在工程检测中得到了广泛应用^[3]。

1.2.1 无损检测技术发展现状

目前,无损检测技术最先进的国家当属美国,而将无损检测技术与工业化实际应用协调得最为有效的国家则应属德国和日本。随着现代化工业的发展和工业水平的提高,我国的无损检测技术也取得了相当大的进步。已经建立和发展了一支训练有素、技术精湛的无损检测队伍。许多中等专科、高等院校中已经形成了一支高素质的无损检测科研队伍以及无损检测专业教育体系。近年来,国内还成立了无损检测学会,很多工业部门也加强了无损检测技术的应用推广,而且已经出现了一批生产无损检测仪器设备的专业厂家。虽然总体上和发达国家还存在差距,但目前,我国的无损检测技术正向快速化、标准化、数字化、程序化和规范化的方向发展,其中包括高灵敏度、高可靠性、高效率的无损检测方法和无损检测仪器。随着科研教育的深入和行业地位的提升,可以预见,我国的无损检测技术将在工业生产中发挥越来越重要的作用,与发达国家的差距也将逐步缩短^[4]。

1.2.2 无损检测技术种类

根据检测原理的不同,无损检测可分为射线检测、声学检测、电磁检测、光学检测、热学检测、渗透检测和漏磁检测等。这其中,射线检测、超声检测、涡流检测、渗透检测和磁粉检测是目前五种最常用、最成熟的检测方法,通常被称为五大常规无损检测技术。

射线检测是利用 X 射线、 γ 射线等对被检工件进行照射,依据不同的工件成分、密度、厚度对射线产生不同的吸收或散射的特性,对工件的质量、尺寸、特性等作出判断的检测方法。射线检测具有检验对象范围广,适用于各种材料,检

测结果显示直观且可以长期保存等特点,在工业应用领域已经形成完整的检测体系。但射线检测可对人体产生电离辐射伤害,且检验成本较高^[3]。

超声检测是利用超声波在物体中的多种传播特性如反射、透射与折射、声速等的变化来检测物体的尺寸、表面与内部缺陷的大小与位置。它适用范围广,穿透力强,对确定内部缺陷有一定的优势。常用的脉冲反射超声检测是一种单面检测技术,便于复杂形状工件的检测,且其设备轻便,操作安全。但它对缺陷进行定量表征有困难,且在探头与工件间隙处需要耦合剂^[5]。

渗透检测是一种以润湿现象和毛细现象为基础的检测技术。这种检测方法可检查各种非疏孔性材料的表面开口缺陷,几乎不受被检部件的形状、大小、组织结构、化学成分和缺陷方位的限制,其检测设备简单,操作方便且检测结果显示直观,检测成本低,适应于野外工作。但渗透检测受被检物体表面粗糙度的影响较大,对疏孔性材料制成的工件、内部缺陷以及开口被杂物堵塞封闭的表面缺陷无法有效地进行检测^[4]。

磁粉检测技术利用被磁化的工件表面不连续处会形成漏磁场,使磁粉聚集并重新排列,从而显示出缺陷形状与位置。它检测灵敏度高,能够直观地显示出缺陷的大小、形状和位置,检测速度快,工艺简单,成本低。但它仅局限于检测能被显著磁化的铁磁性材料,而且只适用于表面和近表面缺陷的检测,难以对缺陷深度进行定量检测,并且对检测人员的经验依赖性大^[3]。

涡流检测利用导电材料在交变激励下因电磁感应产生涡流的原理,通过对电磁物理量(磁场、阻抗、感应电压)的变化进行测量,检测出导体工件中的缺陷。相比上述四种常规检测方法,涡流检测技术有着自己的特点与优势。

1.3 涡流检测技术

涡流检测是一种重要的无损检测技术。涡流现象的发现已经有近二百年的历史,最早将其用于实际检测是 1879 年,休斯 (Hughes) 利用涡流现象判断不同金属和合金,进行材质分选。电磁理论及实验的不断发展与完善,促使涡流检测技术不断发展。1920 年,第一台涡流测厚仪问世,20 世纪 40 年代初,德国科学家福斯特 (Förster) 研制出了以阻抗分析法来补偿干扰因素的涡流测试仪器,并在基础实验和理论推导的基础上发表了大量关于涡流检测的论文,极大地推动了全世界涡流检测技术的发展。我国于上世纪 60 年代才开始开展涡流检测研究,

发展至今，研制了一系列的涡流检测设备，在航空航天、冶金电力、机械化工等领域发挥着重要的作用^[1,6,7]。

1.3.1 涡流检测技术原理

涡流检测的基本原理是电磁感应现象。将导体置于一个变化的磁场中，导体内部会有涡状流动的感应电流产生，称为涡流。如图 1.1.1 所示，检测时在线圈中加载交变电流 I ，则 I 将在周围空间产生一个交变磁场 H 。当线圈靠近被检工件时，由于电磁感应，被检工件中感生出涡流 I' 。而 I' 也是交变的，它会在工件周围空间形成一个感应磁场 H' ，并反过来影响原磁场。这样，检测线圈中的磁场就是激励电流产生的源场 H 与涡流形成的感应磁场 H' 的合成磁场。由于涡流的相位、强度及分布与导体自身多种因素 (如电导率、磁导率、形状、尺寸和缺陷等) 有关，这些因素的变化都会影响感应涡流，使感应磁场 H' 发生变化，从而线圈中的合磁场也将发生改变，进而引起检测线圈的阻抗与感应电压的变化。涡流检测正是通过观察由涡流改变引起的线圈电压或阻抗的这种变化来间接地发现导体内缺陷或其他性质变化的^[1,6]。

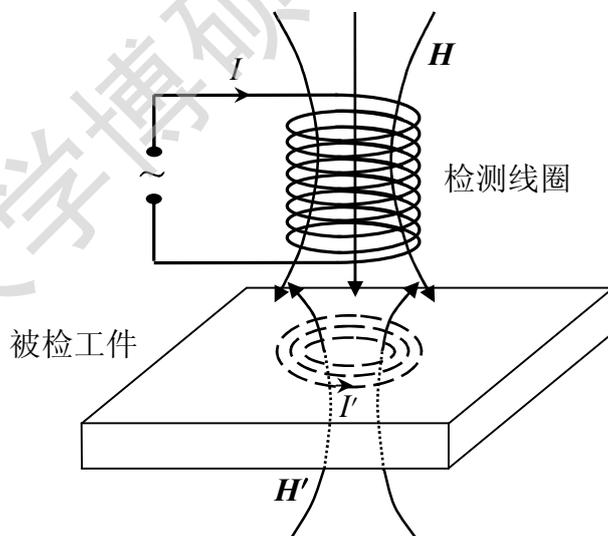


图 1.1.1 涡流检测原理示意图

1.3.2 趋肤效应

当直流电在导体内流过时，导体横截面上的电流密度分布基本上是均匀的。但当导体中加载的是交流电时，它横截面上的电流密度分布将会很不均匀。在涡

流检测中，被检工件中产生的感应涡流正是一种交变电流，因此在导体横截面上会出现电流密度分布不均匀的现象，如图 1.2.1(a) 所示。表面层涡流密度最大，越进入工件中心，涡流密度随着距表面深度的增加而按负指数规律衰减，如图 1.2.1(b) 所示，这一现象就称作趋肤效应^[1,7]。当增加激励电流的频率、导体的磁导率和电导率时，涡流的趋肤效应将变得更加明显。趋肤效应的大小以渗透深度 δ 来衡量。涡流标准渗透深度为涡流密度衰减到其表面涡流密度值的 $1/e$ (37%) 时的深度，也叫趋肤深度，其计算公式为^[7]：

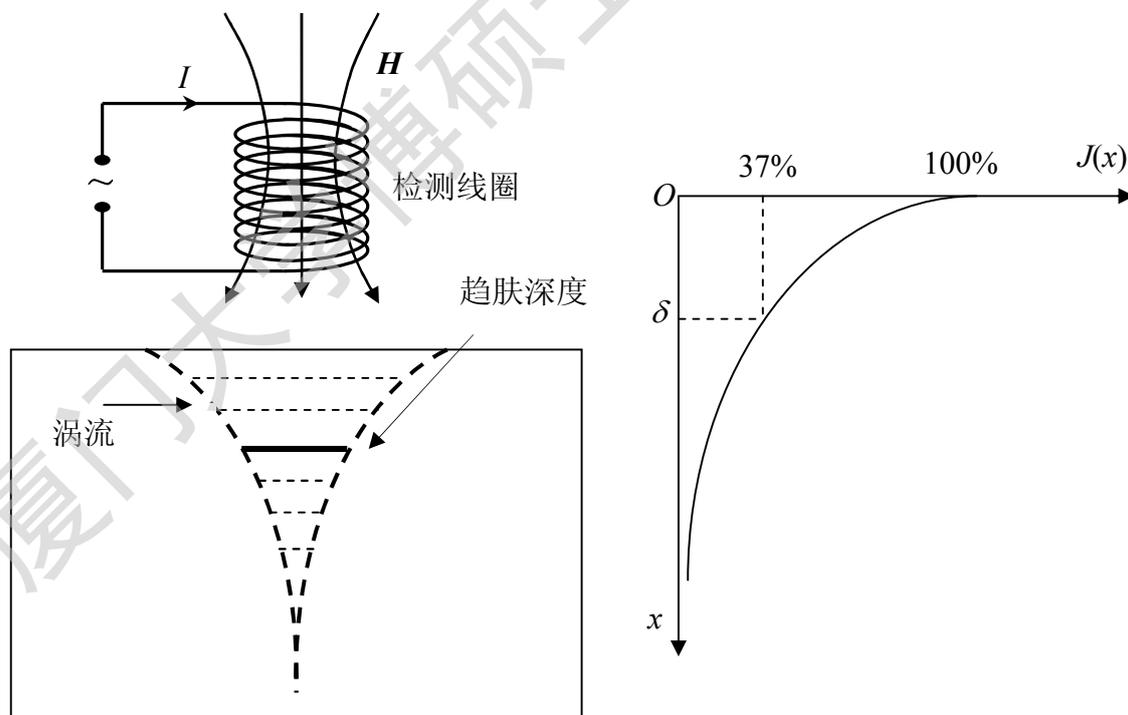
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1.1.1)$$

式中： δ ——渗透深度，米 (m)；

f ——激励信号的频率，赫兹 (Hz)；

μ ——被检工件的磁导率，亨/米 (H/m)；

σ ——被检工件的电导率，欧⁻¹/米 (Ω^{-1}/m)。



(a)导体中涡流分布示意图

(b)归一化涡流密度图

图 1.2.1 趋肤效应示意图

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