

“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代声学科学与技术丛书

磁声成像技术

下册：电磁检测式磁声成像

刘国强 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

现代声学科学与技术丛书

磁声成像技术

下册：电磁检测式磁声成像

刘国强 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

磁声探测与成像是近些年研究的热门课题,涉及电场、磁场和声场的耦合。作为一种多场探测技术,兼具电磁场和声场的优势,在石油矿产资源、环境、海洋、国防、考古、无损探伤、临床医学、食品安全检测等领域具有广泛的应用空间。

本书(下册)针对目前磁声成像中重要分支——电磁检测式磁声成像,重点介绍中国科学院电工研究所工程电磁场及应用研究部的相关研究工作。共分为四篇内容,分别为电磁检测式磁声成像概论、电压检测式磁声成像研究、磁探测式磁声成像研究以及磁声成像技术的再认识。

本书适合电气工程、电子工程、生物医学工程、地球物理电磁测井、工业无损检测等领域的科研人员以及从事医学物理学、医学影像学的医学研究人员阅读参考,也可作为上述专业的硕士生与博士生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

磁声成像技术.下册,电磁检测式磁声成像/刘国强著. —北京:科学出版社,2016.3

(现代声学科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-047656-2

I. ①磁… II. ①刘… III. ①磁声波-声成像 IV. ①0426.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第048908号

责任编辑:刘凤娟/ 责任校对:蒋 萍

责任印制:张 伟/ 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016年3月第一次印刷 印张:11 1/2 插页:4

字数:220 000

定价:79.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“现代声学科学与技术丛书”编委会

主 编：田 静

执行主编：程建春

编 委：（按姓氏汉语拼音排序）

陈伟中 邓明晰 侯朝焕 李晓东

林书玉 刘晓峻 马远良 钱梦騷

邱小军 孙 超 王威琪 王小民

谢菠菽 杨德森 杨 军 杨士莪

张海澜 张仁和 张守著

前 言

电磁探测技术和超声探测技术，是探测技术中的两个重要分支。前者通过外加电磁场（涵盖直流、超低频、高频乃至太赫兹电磁波的不同频段）激励探测目标，检测激励信号经过探测目标的电磁响应信息，获得探测目标的电磁特性参数；后者通过外加超声波激励探测目标，采集到激励信息经过探测目标的声学响应信息，获得探测目标的声学特性参数。

不同物理场相对不同目标体的敏感度不同，电磁场对含流体的目标体敏感，但分辨率不高；超声分辨率高，但空间对比度差。显然，单一物理场探测都有其局限性。利用多物理场耦合效应的探测与成像方法，能够取长补短，兼具不同物理场的优势，越来越引起人们的广泛关注。此外，传感器技术、阵列式测量技术、信息处理技术的迅速发展，带动了微弱信号检测技术的发展，现在计算机硬件的发展也使多场耦合分析、逆问题的快速求解成为可能，由此引发了多物理场探测技术的快速发展。

本书涉及的电磁检测式磁声成像技术是一种多物理场耦合探测技术，它融合了电磁技术、超声技术的优势，兼具无创、对比度好、灵敏度高以及空间分辨率高等优点。在医学成像领域、石油资源探测领域、电力检测领域具有潜在的应用价值。

本书的研究内容是在国家自然科学基金“基于洛伦兹力的生物磁声电导率成像基础研究（51137004）”“基于声辐射力-洛伦兹力的超声-磁电双模成像方法与仪器研制（61427806）”“基于声速编码的时间递进式磁声电成像新方法研究（61002036）”“基于磁声电耦合的过金属套管电阻率成像测井新方法研究（51277169）”“基于磁-声-电效应的电阻率过程层析成像新方法（61401514）”的资助下完成的。

本书融入了作者近十余年的科研成果。在这些研究工作中，感谢我的同事夏正武助理研究员在磁声成像电工学认识上的深入讨论，感谢我的同事夏慧副研究员、李艳红助理研究员，我的硕士研究生曾小平，博士研究生郭亮、杨延菊在实验平台和实验方面的工作，还要感谢郭亮、曾小平和王霜在互易场积分方程建立、多物理场正逆问题分析及数值模拟方面的研究工作。感谢工程电磁场及其应用研究部的所有同事，感谢我的博士生吕敬祥、孙直申、孙文秀和李元园在多物理场探测与成像领域持续不断的探索。感谢李元园在书稿的文字处理与图片加工

上付出的努力。

限于作者水平，书中疏漏之处在所难免，恳请读者给予批评指正。

作 者

2015年12月

于北京中关村

目 录

前言

第四篇 电磁检测式磁声成像概论

第 12 章 绪论	3
12.1 电成像方法概述	3
12.1.1 地球物理电成像	3
12.1.2 油水两相流电学过程层析成像	5
12.1.3 生物医学电阻抗成像	6
12.2 电磁检测式磁声成像概述	7
12.2.1 成像原理	8
12.2.2 国内外研究现状	9
12.2.3 本书的主要研究内容	13
参考文献	14
第 13 章 声场传播问题	18
13.1 流体中的声场方程	18
13.2 固体中的声场方程	21
13.3 声场有限元数值分析	22
13.4 声场角谱法分析	26
13.4.1 轴对称模型中心线声源的角谱法声场分析	27
13.4.2 活塞型平面超声换能器激励的声场	28
参考文献	31

第五篇 电压检测式磁声成像研究

第 14 章 互易场积分方程与电压类波动方程	35
14.1 实际过程的电磁场问题	35
14.2 互易过程的电磁场问题	37
14.3 互易场积分方程	37
14.3.1 互易电流场积分方程	37
14.3.2 互易磁力散度积分方程	39

14.4	电压类波动方程	40
	参考文献	42
第 15 章	电磁场正问题	43
15.1	直接法求电压	43
15.2	互易法求电压	44
15.3	直接法和互易法的数值实验	44
15.3.1	平面模型	44
15.3.2	环形分布源模型	46
15.4	油水两相管流模型电磁场分析	48
15.5	测井模型电磁场分析	52
	参考文献	54
第 16 章	电磁场逆问题	55
16.1	矩阵法重建互易电流密度	56
16.2	时间反演法重建互易电流密度旋度	58
16.2.1	时间反演法	58
16.2.2	数值仿真	60
16.3	压缩感知法重建互易电流密度旋度	61
16.4	由互易电流密度旋度重建电流密度	65
16.5	拟牛顿法重建电导率	67
	参考文献	70
第 17 章	实验系统与实验研究	72
17.1	实验系统总体设计	72
17.2	激励系统	73
17.3	信号采集与测量系统	77
17.4	实验研究	80
17.4.1	铜片实验验证	80
17.4.2	氯化钠溶液实验及结果分析	82
17.5	图像重建	90
	参考文献	93

第六篇 磁探测式磁声成像研究

第 18 章	互易场积分方程与电动势类波动方程	97
18.1	实际过程的电磁场问题	97
18.2	互易过程的电磁场问题	98

18.3	互易场积分方程	99
18.4	感应电动势类波动方程	102
	参考文献	103
第 19 章	电磁场正问题	104
19.1	直接法求解感应电动势	104
19.1.1	先电标位后磁矢位的求解方法	104
19.1.2	基于磁场强度的求解方法	105
19.1.3	基于磁矢位和电标位的瞬态场问题	105
19.2	互易法求解感应电动势	106
19.3	生物电磁模型电磁场分析	107
	参考文献	109
第 20 章	电磁场逆问题	110
20.1	压缩感知法重建电流密度	110
20.2	阻尼最小二乘法重建电导率	113
20.3	电流密度及其旋度联合重建电导率	118
20.3.1	递推法重建电导率	118
20.3.2	对数法重建电导率	120
20.3.3	数值仿真	120
	参考文献	121
第 21 章	实验系统与实验研究	123
21.1	实验系统总体设计	124
21.2	电源系统	125
21.3	同步触发控制与数据采集系统	126
21.3.1	同步触发控制系统	126
21.3.2	数据采集系统	133
21.4	激励系统与屏蔽腔	136
21.5	实验研究	141
	参考文献	144

第七篇 磁声成像技术的再认识

第 22 章	声场-电磁场通用耦合模型	147
22.1	声场-电磁场耦合数学物理模型	147
22.2	低电导率介质的简化模型	148
22.3	低电导率次生效应影响分析	149

22.3.1 超声检测式磁声成像中的次生效应	150
22.3.2 电磁检测式磁声成像中的次生效应	151
22.3.3 阻尼作用对振动速度的影响	151
参考文献	153
第 23 章 问题与展望	154
23.1 磁声成像共性问题	154
23.1.1 低电导率磁声成像的共性问题	154
23.1.2 超声检测式磁声成像中的热效应	155
23.2 展望	156
23.2.1 新原理的电磁检测式磁声成像方法	156
23.2.2 高电导率介质的电磁超声技术	156
参考文献	157
结束语	158
附录 A 矩量法	159
附录 B 压缩感知法	161
附录 C 拟牛顿法	164
附录 D Andrew Hrbek 互易场积分方程	166
附录 E 雅可比矩阵的公式	168
参考文献	169
索引	171

第四篇 电磁检测式磁声成像概论

第 12 章 绪 论

电阻率作为物质内部固有的电学参数，能够反映物质内部原子、分子、晶体的内在特性，在各种电学参数探测领域中具有重要的应用价值。当前，电阻率探测与成像研究已经在生物医学 (Brown, 2001)、地球物理 (Aulia et al., 2001) 和工业检测 (董峰等, 2006) 等许多领域取得了丰硕的研究成果。本书上册主要以医学领域为背景，下册则兼顾地球物理、油水两相流和生物医学领域。

在地球物理探测中，电阻率作为地层重要的物性参数，在矿产探查、油气测井、井间油藏模拟等领域发挥了重要的作用。地层中金属矿藏的电导率普遍高于普通岩层的电导率，基于电法或电磁法的电导率探测与成像系统能够准确反映金属矿藏在地层中所处的位置，是一种可靠、高效的矿产探测方法。在石油测井领域，由于原油和地层水电阻率差异较大，电阻率成像测井可以清楚地观测井孔周围地层，井间电磁成像有望精确探查油藏，为油田生产提供可靠的油藏信息。

在工业生产过程中，电阻率过程层析成像能够以非侵入的方式检测管道或容器中各相流体的相间分布，实现对流体流型的成像检测和流态识别，完成分相流量的计量。尤其是在一些高温、高压的危险工作环境中，工业过程的电阻率在线自动检测系统能够在无人参与的情况下保障工业生产的顺利进行。

在生物医学领域，细胞质或细胞间质内有电解液，细胞核与细胞膜通常是不导电的，细胞尺度上发生的微小病变在宏观上很容易表现出生物组织电阻抗的变化，这为许多疾病的检测提供了一种可行的检测方法。

在上述各种电阻率探测领域中，为了获取物质内部的电阻率信息，往往需要在完整的物体表面安装许多激励源和检测传感器，并依靠特定的反演重建算法，间接测量物体内部的电阻率分布。

12.1 电成像方法概述

12.1.1 地球物理电成像

早在 20 世纪 20 年代，在地球物理领域就出现了电阻率成像 (electrical resistivity imaging) 的设想 (Gish et al., 1925)，在 80 年代以美日等学者为主，完成了基础理论的研究。在观测技术上，1984 年由日本地质检测公司最早实现多道直流测量，3 年后日本在文献中改用英文 “resistivity tomography”，即 “电

阻率层析成像”命名这种成像方法 (Shima et al., 1987), 随后发表了一系列相关论文 (Shima et al., 1988; Shima, 1989; Shima, 1990)。同任何一种新技术的发展过程一样, 早期命名非常混乱以至于英文命名达 21 种以上, 对学术交流和文献检索极其不利。为了规范用词, 在 1992 年和 1995 年于东京召开的国际地学成像会议上, 各国代表一致同意对该技术采用统一严谨的专业词汇——电阻率层析成像 (resistivity tomography) (冯锐等, 2004)。电阻率层析成像具备生产成本低、工作效率高等优点而备受青睐。目前 2 维、2.5 维电阻率层析成像在探测地下结构、寻找金属和非金属矿产、考古以及水文工程地质等方面已经得到了广泛的应用。

测井技术起源于 1927 年的法国, 经历了从模拟测井到数字测井、数控测井、成像测井的发展历程。电成像测井是成像测井技术的重要分支, 包括地层微电阻率扫描成像测井、阵列感应成像测井、方位电阻率成像测井。电阻率扫描成像测井仪器是在多个极板上分别安装若干个间距很小的纽扣电极, 向井壁地层发射电流, 地层电阻率的差异引起电流分布, 据此生成井壁的电阻率图像, 阵列电极对井眼周围地层的覆盖率几乎可以做到全井眼覆盖。电阻率扫描成像测井仪器主要用于确定地层倾角和方位, 描述油气层的结构和特征, 被地质学家称为“地下地层显微镜”。斯伦贝谢、哈里伯顿和阿特拉斯公司研制了 FMI (fullbore formation micro image)、EMI (electrical macro imaging tool) 和 Star 型井壁微电阻率成像仪。阵列感应测井采用单线圈多频率发射多线圈接收, 测量了多个原始实分量和虚分量信号, 利用软件聚焦的方式, 获得不同探测深度和不同纵向分辨率的电阻率曲线, 根据所获得的基础数据进行二维电阻率径向和侵入带剖面的成像。在 20 世纪 80 年代, BPB 公司推出 AIS 阵列感应测井仪, 斯伦贝谢等三大石油测井公司分别推出了新型阵列感应成像测井仪 ATI、高分辨率阵列感应仪 HRAI 和高分辨率感应仪 HDIL。在油气层中, 阵列感应成像可以反映冲洗带、过渡带和原状地层油气饱和度的变化, 清楚地显示层理、油气含量和侵入性质及其特征。方位电阻率成像测井 (azimuthal resistivity image, ARI) 采用多个电极覆盖井周 360 度方位范围的地层, 可以测量多个方位的电阻率。与地层微电阻率扫描成像相比, 其纵向分辨率略低, 但它具备径向探测深度大、不受井眼坍塌与不规则的影响, 并且能与双侧向测井组合测井等优点 (张守谦等, 1997)。

井间电磁成像 (crosswell electromagnetic tomography) 是将低频 (10Hz~20kHz) 发射源置于发射井中, 在一口或多口接收井中测量磁场的水平和垂直分量, 通过反演得到井间电阻率分布的二维乃至三维图像, 用于监测水驱、蒸汽驱及聚合物驱过程 (曾文冲等, 2001)。与电成像测井相比, 它的横向探测范围更大, 是地球物理技术的前沿。从 90 年代开始, 美国加利福尼亚大学伯克利分校

和美国劳伦斯-伯克利、劳伦斯-利物莫、桑迪亚等国家实验室的一批研究者，先后完成了 EMT 系统的基本理论、数值模拟和现场可行性研究 (Alumbaugh et al., 1995; Wilt et al., 1995; Zhdanov et al., 1996; Wilt et al., 1999)，并设计和制造出相应的实验仪器。目前重点围绕提高井间电磁成像仪器测量精度、消除金属套管影响、快速高精度电磁逆散射成像等难题展开研究。

12.1.2 油水两相流电学过程层析成像

多相流广泛存在于石油、化工、动力、核能、食品等工业领域。在石油、化工行业中，流体的流动特性往往比较复杂，具有多相混合流动的特点。根据混合物的组成成分不同，多相流又分为液固、气固、气液、液液及气液固等形态。油水两相流普遍存在于长距离的集输管线中，通常是经过液相、气相和固相分离后的液相流体，主要包括原油和地层水，属于液液多相流体，是油田生产、油气储运和化工行业中的主要检测对象，对油水两相流流型的辨识和准确计量是其中不可缺少的关键生产流程。

油水密度存在差异，水相如果长期沉积于管道底部容易导致腐蚀加剧，引发泄漏事故。2013 年发生的 11.22 青岛输油管线爆燃事故的原因之一就是管道的长期腐蚀、损坏引起的原油泄漏。如果缺乏对管线中油水两相流长期、有效地监管，将直接影响到油区的安全生产，对人民的生命财产安全造成威胁。因此油水两相流流型的可视化监测，对产量的计量、生产效率的评估、油田安全的生产和管理具有非常重大的现实意义。

与单相流相比，油水两相流具有更复杂的流动特性和随机特性，当流量较低时，由于流体能量较小，水平管中主要以分层流为主；当流量较大时，则主要以分散流为主；当流量介于两者之间时，既存在分层流，在分层交界面处也存在大量的分散流，油和水之间没有明确的分界面，形成了一系列油包水或者水包油的微小颗粒，使得准确计量和流型识别难度很大 (许道振等, 2011)。

工业过程层析成像以多相流为主要研究对象，对多相流中的过程参数进行实时检测。利用过程层析成像可以提供被测流体在管道某个截面的实时图像，用于识别与判断流型及确定相间界面；同时还能确定多相流体各相组分在容器或管道中的局部浓度分布，确定离散相的颗粒尺寸和运动轨迹等微观参数。

过程层析成像采用的检测手段主要有核子 (包括 X 射线、 γ 射线、中子射线、正电子、光子)、超声波、电学 (电阻、电容、电磁感应)、光学、核磁共振等几类十余种方式。

超声过程层析成像和电学过程层析成像是相对研究最多的两种层析成像技术。超声层析成像以超声波为扫描源，利用被测介质对入射声波的吸收和散射效

应,引起声波幅度、相位和传播方向的变化,在不同角度和方向扫描管道横截面,获得介质的声速或者密度分布图像。超声层析成像有反射式、衍射式及透射式等多种测量模式,空间分辨率与超声波波长相关,优于电学层析成像方法。但由于超声波本身物理特性的限制,油和水的密度和声速非常接近,不适用于超声波折射或反射检测,声程长导致消耗的检测时间多,实时性差,系统难以对高速多相流体进行准确的实时测量(Tarantola, 1984)。在油水两相流中,水的电阻率在 $1\Omega \cdot \text{m}$ 左右,而油滴混合物的电阻率在 $50\Omega \cdot \text{m}$ 左右,二者电阻率相差非常大,电学过程层析成像具有很高的介质对比度。此外,与超声相比,电学层析成像实时性强,测量快速准确,设备结构简单,宜于工业现场应用。1985年以来,曼彻斯特大学理工学院(UMIST)首先开展了两相管流二维层析成像方法研究,并于1988年研制成8电极电容层析成像系统(Beck et al., 1996),1990年又改进为12电极成像系统。随后,电学过程层析成像技术得到了突飞猛进的发展。电学过程层析成像包括电阻层析成像、电容层析成像及电磁感应层析成像。其中,电阻层析成像技术(electrical resistance tomography, ERT)是一种基于电阻传感机理的层析成像技术,主要应用于多相流体中连续相为导电介质的可视化参数监测,具有无辐射、响应速度快、非侵入、低成本等优点。受限于检测电极的个数,ERT的成像分辨率低,成像质量不理想,针对较小的油水颗粒很难进行区分,目前测量精度仅在 $5\% \sim 10\%$ (吴瑞芬, 2007)。电容层析成像(electrical capacity tomography, ECT)的测量原理是根据多相流的不同组分具有不同介电常量的特征,利用在管道周围的电容传感器测量的电压信号重建介质的介电常量信息。其重建分辨率仍然受到检测极板个数的限制,并且当介质的电导率较高时,由于电导率的影响,电容层析成像的测量结果误差较大(李利品等, 2012)。油田生产后期的产液主要以地层水为主,相对而言,属于高电导率介质,应用电容层析成像的效果较差。

12.1.3 生物医学电阻抗成像

研究表明,生物组织的结构、类型、温度、含水量,以及病理状态会导致电阻抗的明显变化(Gabriel et al., 1996; Gabriel et al., 1996a, 1996b)。生理和病理变化改变组织细胞膜的通透性和细胞液的浓度,从而影响到电阻抗的特性。利用电阻抗成像检测方法不仅可以对生物组织器官的种类进行区分,还可以对生理、病理状态进行识别,并通过生物组织电学特性的改变早期发现生理、病理异常,为疾病早期诊断提供数据支持(董秀珍, 2008; 刘国强, 2006)。

Gabriel等给出了几种典型的正常人体组织和恶性肿瘤组织在不同频率下的电导率,其中肌肉或恶性肿瘤等高含水组织的电导率比脂肪或正常乳腺组织的电

导率高大约一个数量级。Joines 等测量了 50MHz~0.90GHz 范围内大肠、肾、肝脏、肺、乳房和肌肉的电导率 (Joines et al., 1994)。研究发现,对于同种类型的乳腺组织,恶性肿瘤组织的电导率在乳腺组织中是最大的 (Stoy et al., 1982)。Chaudhary 在低于 3GHz 的频率范围内对比了 15 个患者正常与恶性乳腺肿瘤的电特性,结果发现恶性肿瘤的电导率是正常组织的 4.7 倍 (Chaudhary et al., 1984)。其他研究结果表明:前列腺正常组织和肿瘤组织电导率的差别为 30%;大脑灰质正常组织和水肿组织电导率的差别则高达 50% (Gabriel et al., 1996a)。Chaudhary 等还测量了老鼠纤维肉瘤出现后 7 天、15 天与 30 天的电导率,发现恶性肿瘤的电导率都很高,但随着肿瘤的增长,电导率没有明显变化。当较大的肿瘤出现内部坏死时,电导率的变化在频率高于 0.5GHz 后变得很小 (Chaudhary et al., 1984)。

国内外学者提出了各种各样的医学电磁成像技术。医学电阻抗成像技术 (electrical impedance tomography, EIT) 是根据人体不同器官、组织和健康状况具有不同的电阻抗的特点,通过给人体注入安全电流,测量体表的电位信息,重建人体内部电阻抗分布及变化的图像。自从 1978 年 Henderson 等提出电阻抗成像方法以来 (Henderson et al., 1978),电阻抗成像技术渐渐发展成为医学成像中的一个新领域。与其他生物组织成像方法相比,电阻抗成像技术作为一种功能成像方法,有望实现疾病的早期诊断和预防,并且有助于疾病的康复指导和愈后评价。生物组织电阻抗成像与常规的核素和射线成像不同,它成本低,能够无创、重复性使用,具有长期医学图像监护的应用前景。

EIT 技术目前已报道的研究均限于理论和实验研究,还没有在真正意义上应用于临床。国内外大多数学者认为,利用 EIT 技术进行疾病早期诊断的主要问题是系统分辨率较低和逆问题的不适定性。实现系统的高精度、高分辨率成像及算法的快速收敛是目前电阻抗成像技术的主要研究热点 (刘国强, 2006)。

12.2 电磁检测式磁声成像概述

如上所述,在电阻率层析成像 (ERT)、生物医学电阻抗成像 (EIT) 以及电阻率成像测井等领域,目标体内部电阻率的非侵入式检测与成像都是其最终目标。

在 EIT 和 ERT 等常规的电导率成像方法中,虽然待测参数对比度较高,但是受到检测传感器数量的限制,空间分辨率较低,其发展与应用受到很大的制约。

与电阻率成像方法相比,超声成像方法空间分辨率较高,并随超声波长的变