

“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

## 上册：超声检测式磁声成像

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

## 上册：超声检测式磁声成像

刘国强 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

磁声探测与成像技术是近些年研究的热门课题,涉及电、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(上册)针对目前磁声成像中最活跃的分支——超声检测式磁声成像,重点报道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。全书共分为三篇内容,分别为概论、感应式磁声成像和注入电流式磁声成像,其中论述了电磁场和声场的正逆问题,以及二者的耦合问题。

本书适合电气工程、电子工程、生物医学工程、生物电子学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。此外,本书论述的磁声成像方法还可供地球物理电磁成像、工业无损检测以及电力领域的科研人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

磁声成像技术,上册,超声检测式磁声成像/刘国强著. —北京:科学出版社, 2014.6

(现代声学科学与技术丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-041233-1

I. ①磁… II. ①刘… III. ①磁声波—超声成像 IV. ①O426.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 128407 号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:宋玲玲

责任印制:赵德静/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>

北京源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014年6月第一版 开本:720×1000 1/16

2014年6月第一次印刷 印张:18 1/2 插页6

字数:357 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 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,检测激励信息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。

不同目标体相对不同物理场的敏感度不同,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。

本书涉及的磁声成像技术就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项目“基于洛伦兹力的生物磁声电导率成像基础研究”(51137004)、“基于单分量洛伦兹力密度的非接触磁声成像方法研究”(60802086)、“磁声显微成像方法研究”(61271424),北京市科技项目“非旋转感应式磁声电阻抗成像新技术研究及新型成像装置的研制”(2009B48)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,首先要感谢我的硕士研究生王涛和蒙萌在电磁成像领域的前期探索,他们的探索研究为后续工作奠定了基础;感谢我的同事夏慧副研究员、李艳红助理研究员,我的硕士研究生江凌彤、孙凯、陈晶和博士研究生黄欣在实验平台和实验方面的工作;还要感谢我的博士后张洋副教授,硕士研究生王浩、贺文静、陈晶和博士研究生黄欣几年来在多物理场正逆问题分析及数值模拟方面的研究工作。感谢吴石增研究员、北京航空航天大学大学的雷银照教授,对本书提出了许多修改完善意见。

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

2013年12月于北京中关村

# 彩 图

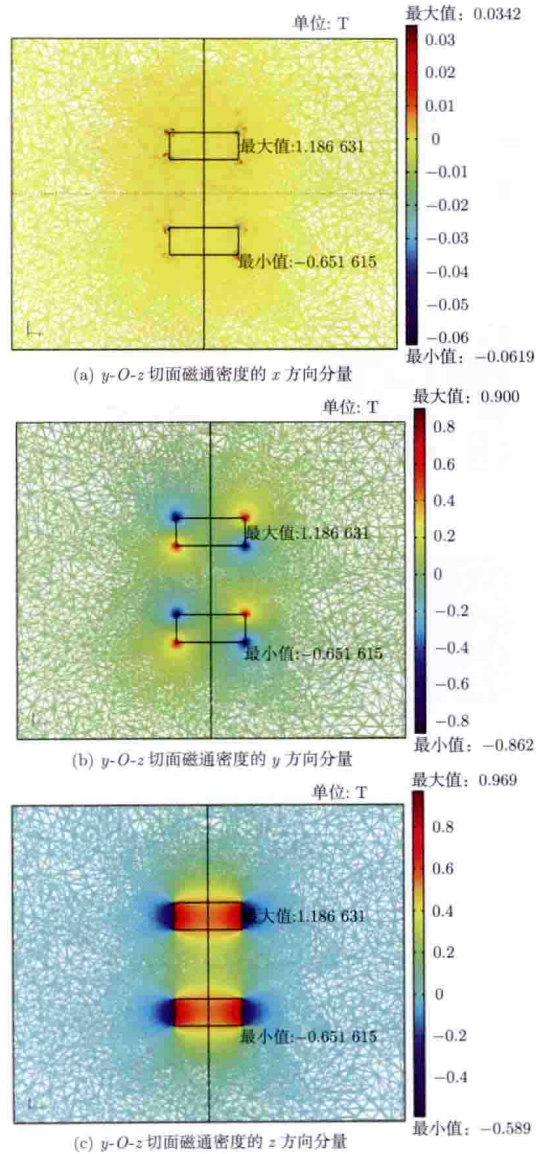


图 3.31  $y$ - $O$ - $z$  截面上各方向的磁通密度

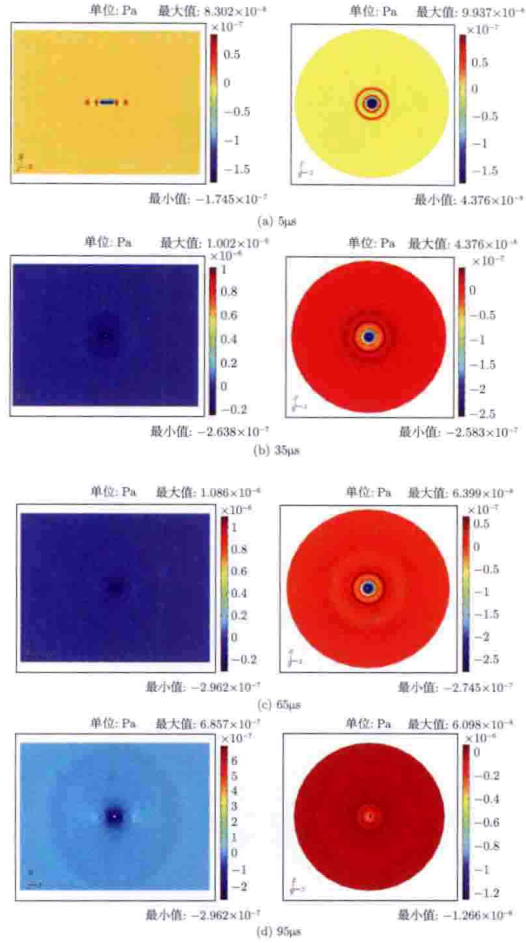


图 5.10 不同时刻、不同剖面的声场分布图

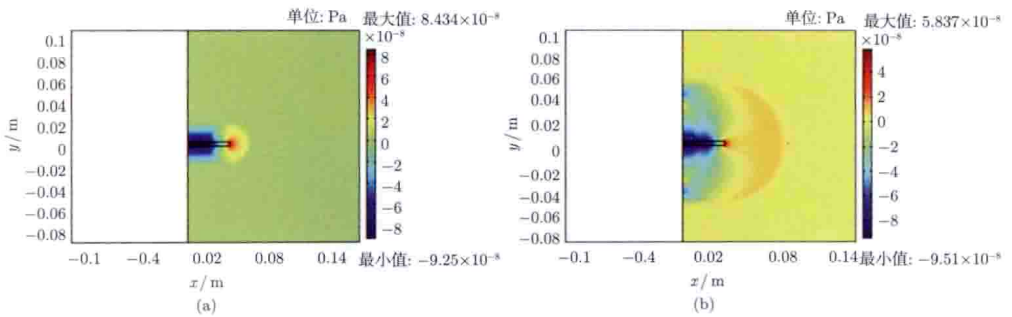


图 5.11 13μs(a) 和 40μs(b) 时刻任一扇形面上的声场分布图

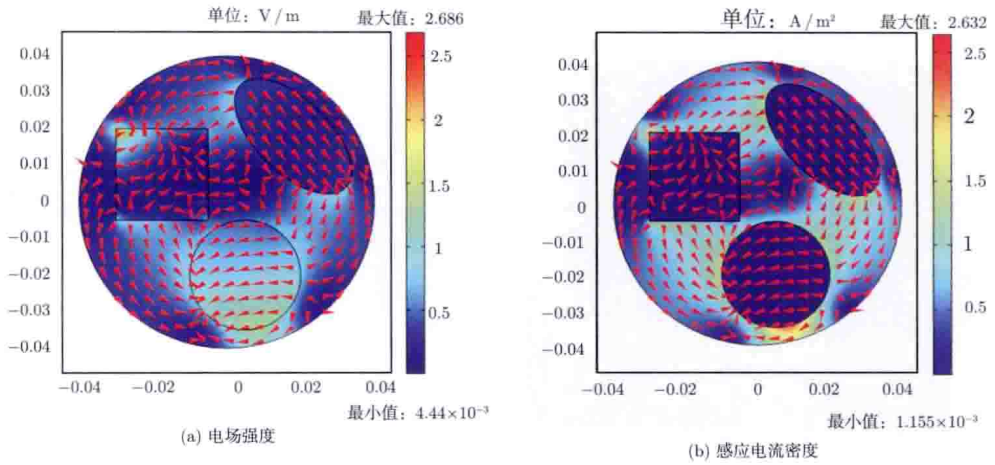


图 6.4 电场强度和感应电流密度分布图

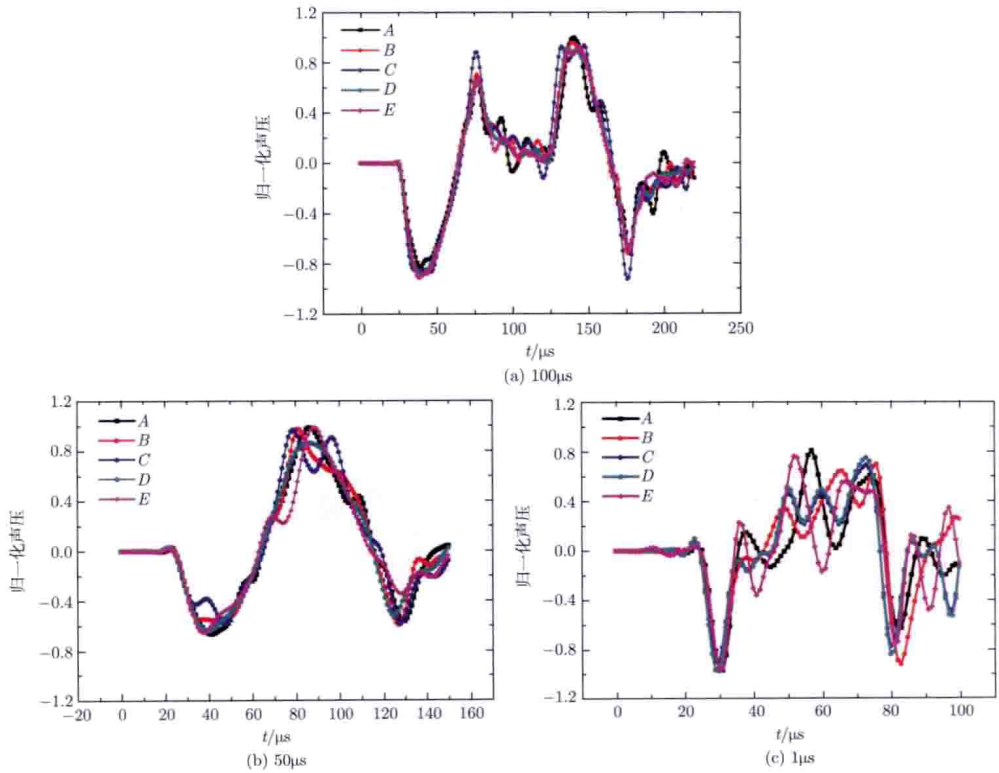


图 6.5 不同振动声源激励下的声压波形



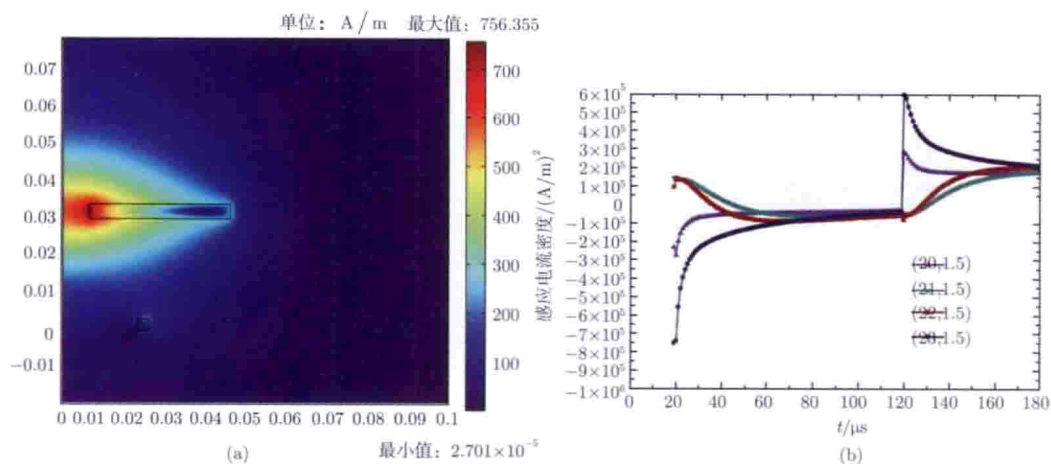


图 6.8 感应磁场强度分布 (a) 和感应电流密度的时序图 (b)

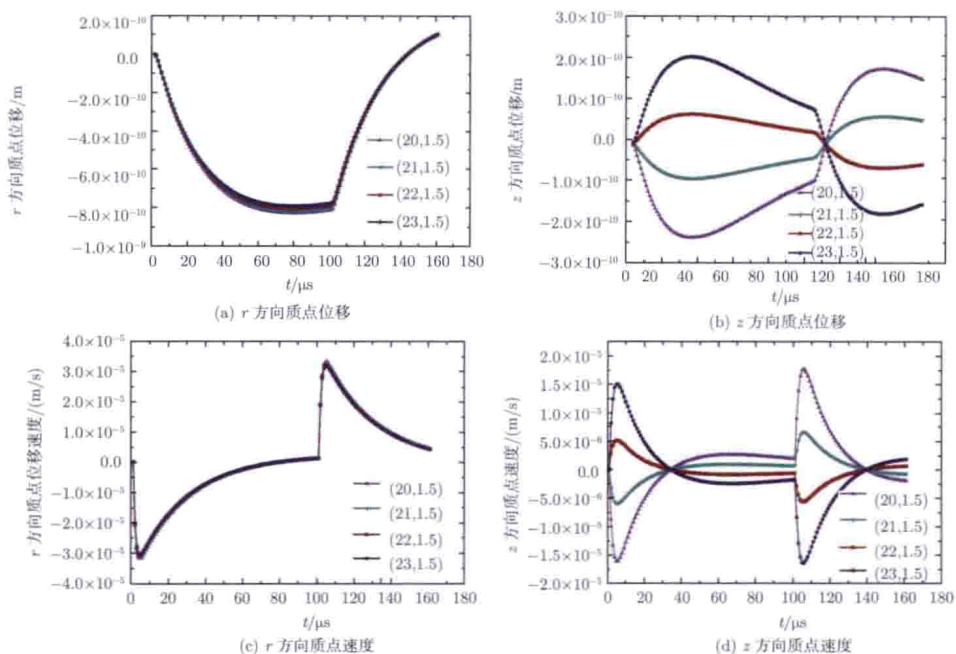


图 6.9 质点振动特性



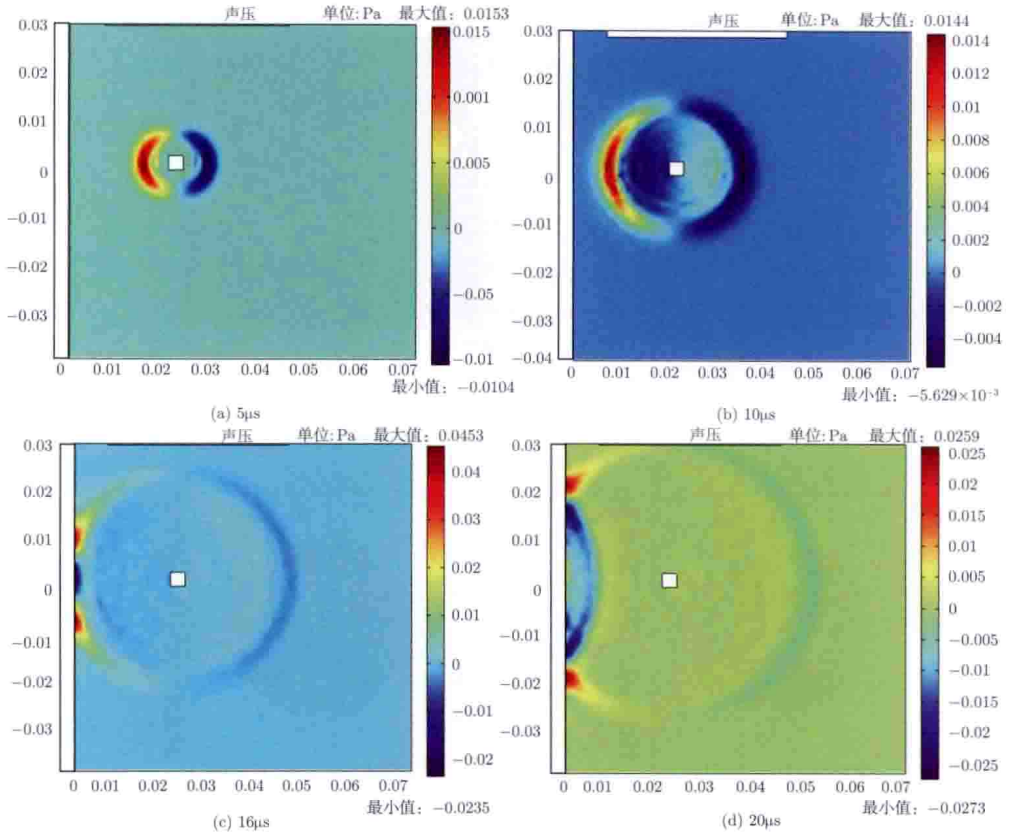


图 6.10 声场传播特性

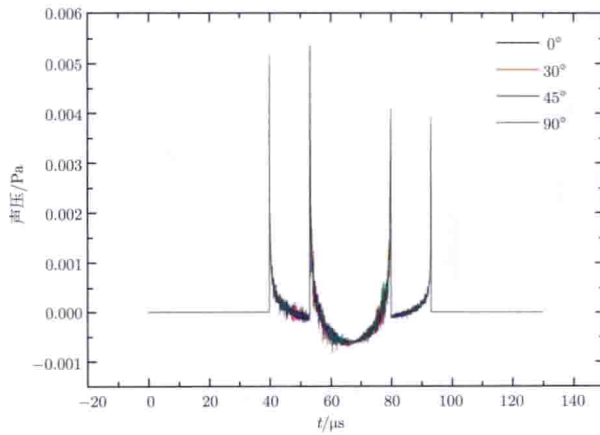


图 7.7 四个不同检测点的声压时序图

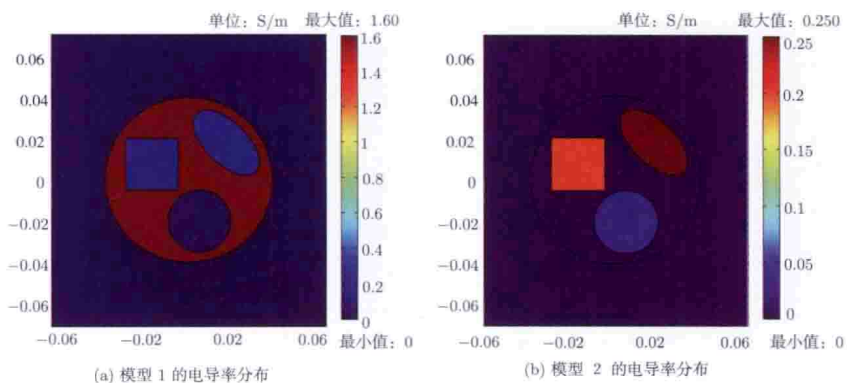


图 8.35 电导率分布的示意图

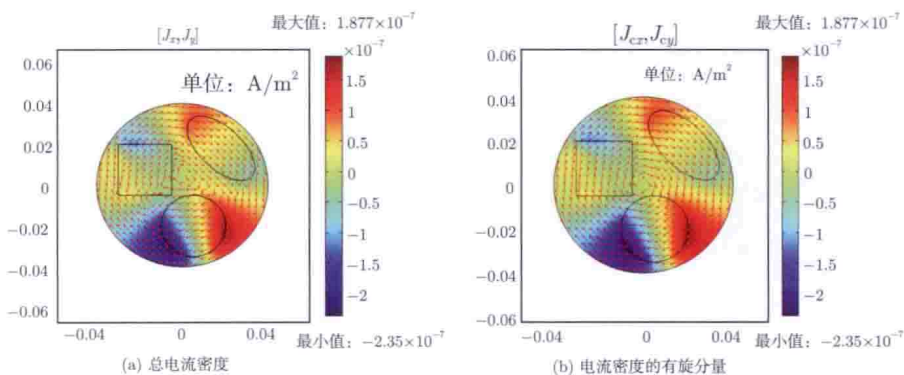


图 8.36 模型 1 求解的涡流

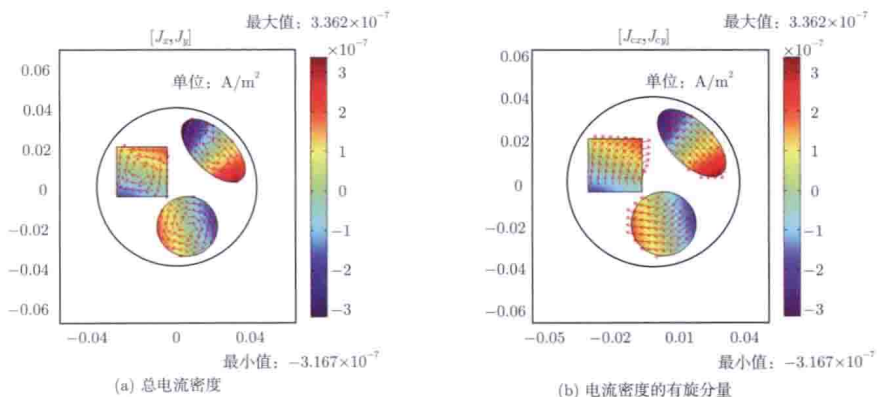


图 8.37 模型 2 求解的涡流

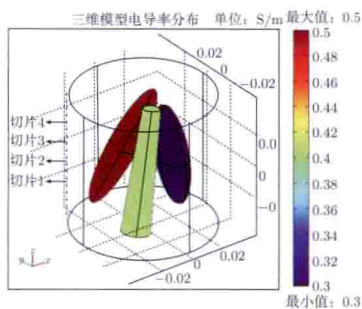


图 8.39 三维仿真模型示意图

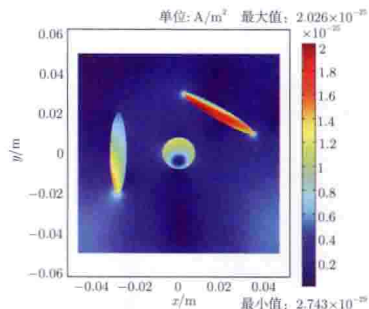


图 9.5 总电流密度模值的分布

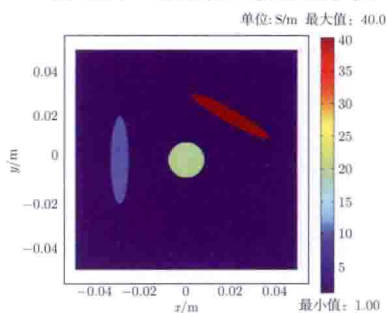


图 9.6 样品电导率分布

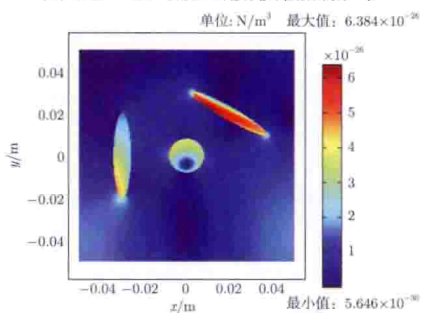


图 9.7 样品中的洛伦兹力模值分布

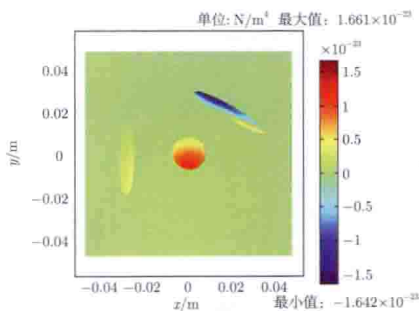


图 9.8 磁力散度分布

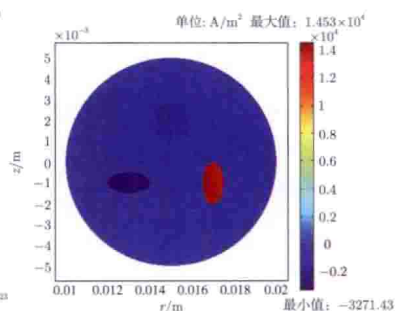


图 9.10 样品子午面上的总电流密度  $\phi$  分量

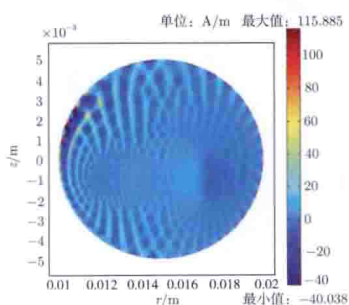


图 9.11 样品子午面上的磁场  $z$  分量

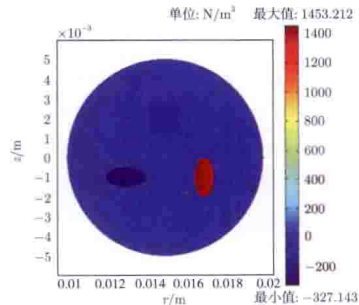


图 9.12 洛伦兹力云图

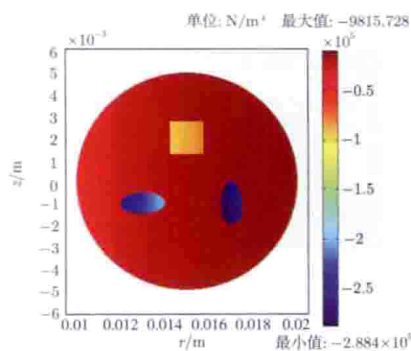


图 9.13 磁力散度云图

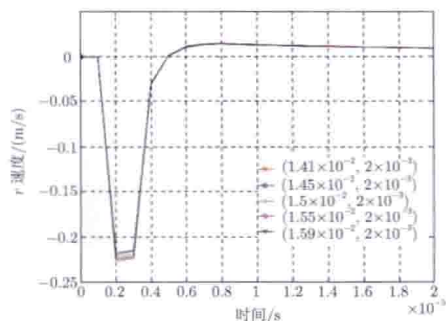


图 9.27 质点  $r$  方向的运动速度随时间的变化曲线

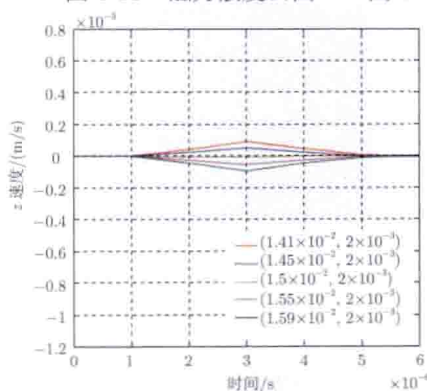


图 9.28 质点  $z$  方向的运动速度随时间的变化曲线

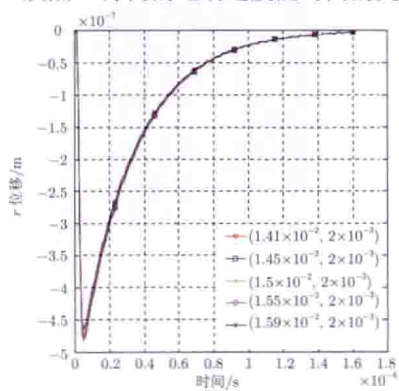


图 9.29 质点在  $r$  方向的位移随时间的变化

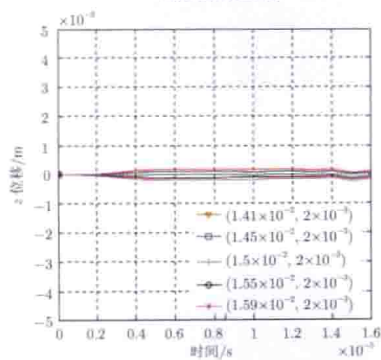


图 9.30 质点  $z$  方向的运动速度随时间的变化曲线

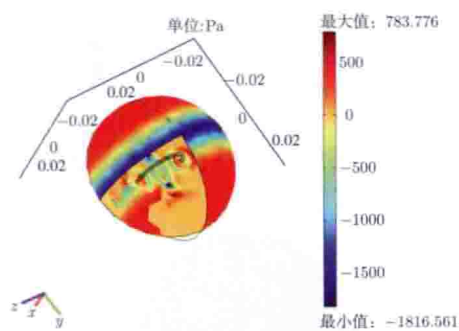


图 9.32 三维模型中  $z$ - $O$ - $y$  截面及边界上的声压分布图

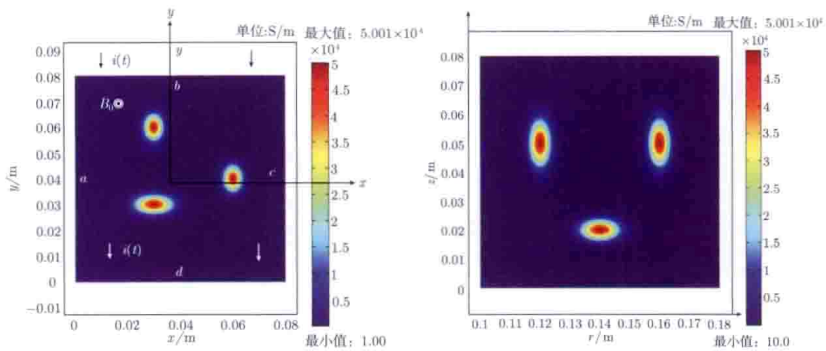


图 10.2 模型的电导率分布      图 10.12 轴对称模型子午面上的电导率分布

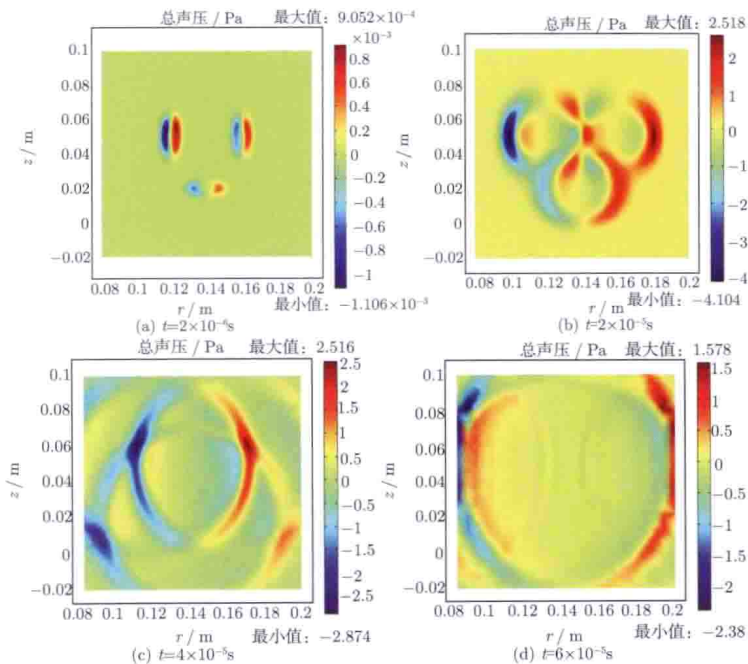


图 10.13 样品子午面上的声场辐射图

# 目 录

前言

## 第一篇 超声检测式磁声成像概论

第 1 章 绪论	3
1.1 医学成像方法发展概述	3
1.2 磁声成像方法概述	8
1.2.1 磁声成像方法的发展历程	9
1.2.2 磁声成像方法分类	11
1.2.3 本书的主要研究内容	14
参考文献	14
第 2 章 成像方法原理	18
2.1 电磁理论基础	18
2.2 声学理论基础	19
2.3 激励检测原理	20
2.4 成像方法与关键技术研究	22
参考文献	23
第 3 章 硬件实验系统	25
3.1 电流激励源	25
3.1.1 窄脉冲电流激励源	26
3.1.2 方波电流激励源	35
3.2 激励线圈	38
3.3 静磁场产生装置	42
3.4 超声信号检测系统	48
3.4.1 超声换能器	48
3.4.2 超声信号调理模块	50
3.5 同步触发控制系统	51
3.5.1 同步触发控制系统及采集系统的硬件构成	51
3.5.2 同步触发控制系统及采集系统的软件设计	53
参考文献	55

## 第二篇 感应式磁声成像研究

<b>第 4 章 电磁场正问题研究</b> .....	63
4.1 任意激励信号下的电磁场正问题研究 .....	63
4.1.1 本书中对电磁场量的符号约定 .....	63
4.1.2 磁准静态近似条件下消去时间项的麦克斯韦方程组 .....	65
4.2 一维电磁场正问题研究 .....	66
4.2.1 泊松方程及解析解的导出 .....	66
4.2.2 亥姆霍兹方程及解析解的导出 .....	71
4.2.3 仿真计算与结果分析 .....	75
4.3 二维电磁场正问题研究 .....	77
4.3.1 二次磁场法 .....	78
4.3.2 仿真计算与结果分析 .....	79
4.4 三维电磁场正问题研究 .....	81
4.4.1 三维瞬态涡流场计算方法 —— 磁矢量-电标位法 .....	81
4.4.2 消去时间项的三维电磁场求解方法 —— 电标位法 .....	84
4.4.3 电标位法的数值验证仿真计算与结果分析 .....	86
4.4.4 电标位法中忽略二次磁场的合理性分析 .....	90
4.4.5 电标位法的适用范围 .....	93
参考文献 .....	94
<b>第 5 章 声场正问题研究</b> .....	96
5.1 声学均匀介质中的格林函数积分解 .....	96
5.1.1 任意声源的格林函数积分解 .....	96
5.1.2 任意平面声源的格林函数积分解 .....	99
5.1.3 圆盘声源的解析解 .....	101
5.2 声场正问题的数值方法 .....	107
5.2.1 基于声压-质点振速耦合方程的声场数值方法 .....	108
5.2.2 基于位移方程和质点振速方程的声场数值方法 .....	109
5.2.3 基于弱形式处理声压波动方程中磁力散度项的声场数值方法 .....	110
5.2.4 对边界处的磁力散度项应用散度定理的声场数值方法 .....	111
5.3 声场正问题解法的仿真比较 .....	111
5.3.1 圆盘声源的解析解和积分解的比较 .....	112
5.3.2 声场解析解和数值解的比较 .....	113
5.3.3 三种不同方法数值解的比较 .....	115
5.4 声学特性非均匀模型正问题数值分析 .....	117



参考文献	120
<b>第 6 章 多物理场问题研究</b>	121
6.1 电磁场-声场耦合问题	121
6.1.1 理论分析	122
6.1.2 仿真分析	124
6.2 电磁场-固体位移场-声场耦合问题	128
6.2.1 轴对称电磁场方程理论分析	129
6.2.2 轴对称弹性固体的纳维方程的导出	132
6.2.3 轴对称声压波动方程的导出	133
6.2.4 仿真分析	134
参考文献	137
<b>第 7 章 声场逆问题研究</b>	138
7.1 声源的重建方法	138
7.1.1 磁力散度声源的时间反演法	140
7.1.2 洛伦兹力声源的重建算法	143
7.1.3 洛伦兹力势声源的重建算法	144
7.2 声场逆问题仿真研究	145
7.2.1 基于全扫描的声源重建	145
7.2.2 基于有限角度扫描的声源重建	150
7.2.3 检测点密度对于重建质量的影响	152
7.2.4 三维模型断层面声源重建	153
参考文献	156
<b>第 8 章 电磁场逆问题研究</b>	158
8.1 一维模型电磁场逆问题	158
8.1.1 直接求解法原理公式	159
8.1.2 电场迭代法原理公式	160
8.1.3 一维模型逆问题的仿真实验与结果分析	161
8.2 二维模型电磁场逆问题	163
8.2.1 二次磁场-电阻抗重建方法	163
8.2.2 二维模型逆问题仿真实验结果	165
8.2.3 算法的噪声分析	173
8.3 三维电磁场逆问题	175
8.3.1 三维代数迭代算法	176
8.3.2 三维模型仿真实验	178
8.4 基于洛伦兹力的三维电磁场逆问题重建	189

8.4.1	电磁场逆问题重建算法	189
8.4.2	电导率重建数值仿真分析	191
8.5	基于涡流场有旋分量的电导率重建方法	194
8.5.1	重建算法	194
8.5.2	二维模型验证	195
8.5.3	二维模型验证	197
8.6	实验和图像重建	200
8.6.1	实验装置搭建	200
8.6.2	实验设计和验证	201
	参考文献	206

### 第三篇 注入电流式磁声成像研究

第 9 章	正问题研究	211
9.1	电磁场正问题	211
9.1.1	平面模型的电磁场正问题	211
9.1.2	轴对称模型的电磁场正问题	218
9.2	声场正问题	222
9.2.1	圆盘模型的声场解析解	222
9.2.2	声场仿真计算	224
9.3	基于超声换能器的声场求解	225
9.3.1	基于超声换能器响应的声场方程	226
9.3.2	仿真结果与讨论	226
9.4	固体样品的注入电流式磁声成像研究	228
9.4.1	仿真模型设计	229
9.4.2	理论分析	229
9.4.3	仿真结果分析	231
9.5	本章小结	237
	参考文献	238
第 10 章	逆问题研究	239
10.1	声场逆问题的理论分析	239
10.1.1	基于维纳滤波反卷积的磁声信号复原	239
10.1.2	时间反演法	241
10.2	电磁场逆问题的理论分析	242
10.2.1	平面模型的电磁场逆问题	242