

磁声成像技术

报告人：贺文静 刘国强

中科院电工所

2010. 10. 28



主要内容





研究背景及意义

- 我国肿瘤发病率约为200/10万人，每年新发病例约220万人以上。专家预计：如不加以防控，2020年中国癌症死亡人数将超400万。
- 这从一个侧面对疾病的早期发现和明确诊断提出了急切的要求，因此医学专家提出了“**治未病**”这一健康工程理念，旨在实现“早发现”、“早治疗”、“提高治愈率”。
- 传统的器质性成像方法明显不能满足这一临床需求，这就为**功能性医学影像技术**提供了广阔的发展空间。

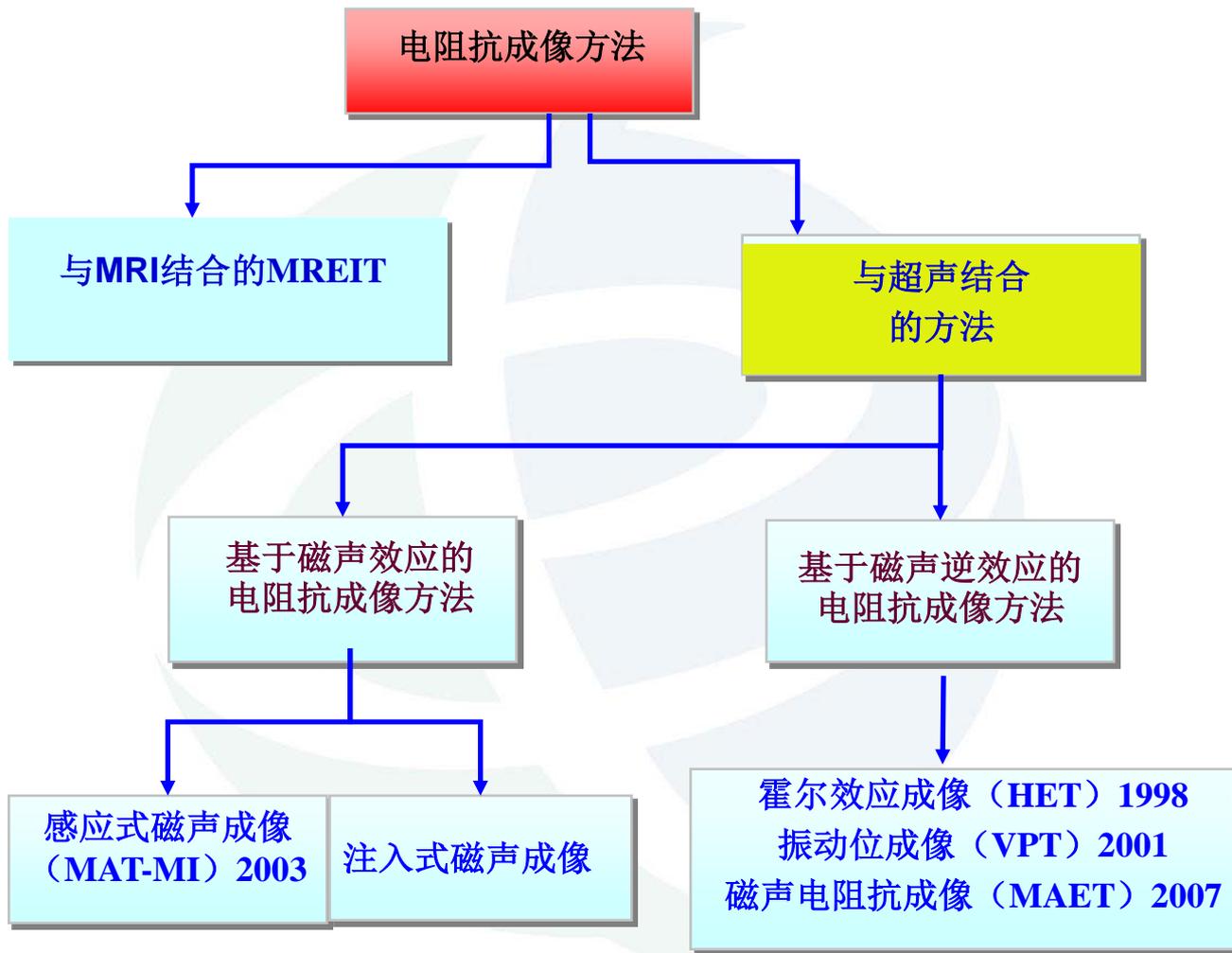


研究背景及意义

- **电阻抗成像**是功能成像的代表技术之一，它是医学影像学前沿，是生物医学、电磁学、电工学的重要交叉。
- 经过多年的发展，电阻抗成像（EIT）已经由一个狭义的注入电流电阻抗成像发展为一个“家族”，如EIT、MIT、MREIT、MAT等，各有特色。在研究人体生理功能监测、疾病早期诊断和脑功能研究方面具有重要的应用价值和广泛的应用前景
- 目前电阻抗成像的不足是分辨率不高。



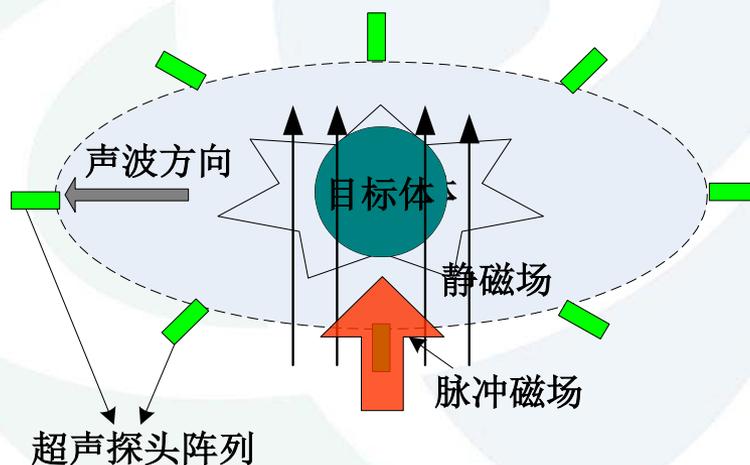
研究背景及意义





研究背景及意义

- 2005年，美国明尼苏达大学的Bin He教授提出的感应式磁声成像技术（Magneto-acoustic Tomography with magnetic induction, 简称MAT-MI）理论上成像的空间分辨率可达到0.3mm

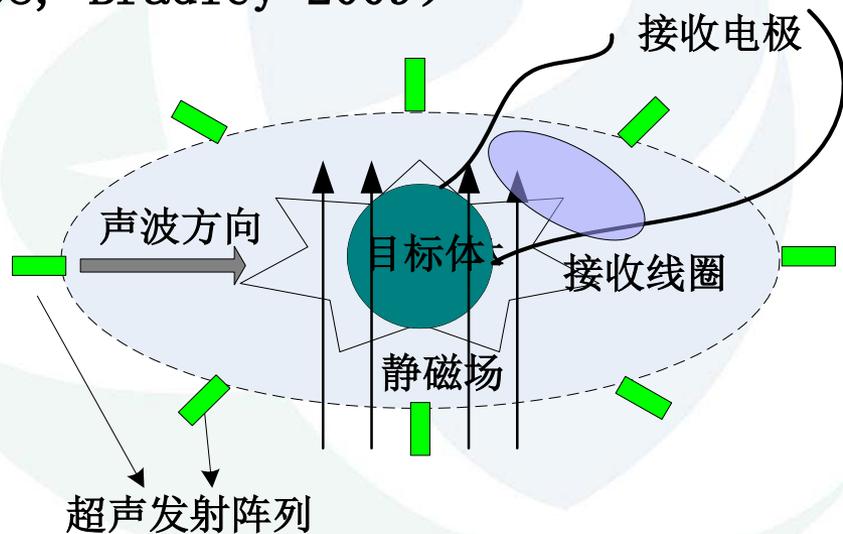


感应式磁声成像技术



研究背景及意义

- 1992到2000年Wen H等陆续报道了利用霍尔效应的成像方法
- 振动位成像（VPT）
- Xu提出磁声电成像方法（Magneto-acoustic -Electrical Tomography, 简称MAET, Xu 2007）。近年来随着MAT-MI的快速发展，促使人们开始关注并重视基于逆效应的成像方法（Xu 2007, Haider 2008, Nancy 2008, Bradley 2009）



基于磁声逆效应的电阻抗成像方法



感应式磁声成像

磁感应电磁成像

- 无创
- 对比度好
- 灵敏度高
- 探测深度大

超声成像

- 分辨率高
- 电磁干扰小
- 信噪比高

信息量丰富，极大地克服了传统电磁成像求解逆问题的不适定性，同时可以解决成像目标内部电导率敏感度低的问题

根据这种成像技术有望开发出低成本、易操作的早期无损检测系统，对确保人民群众的身体健康、创造和谐社会有着重要的现实意义。

主要内容



报告 内容

1 研究背景及意义

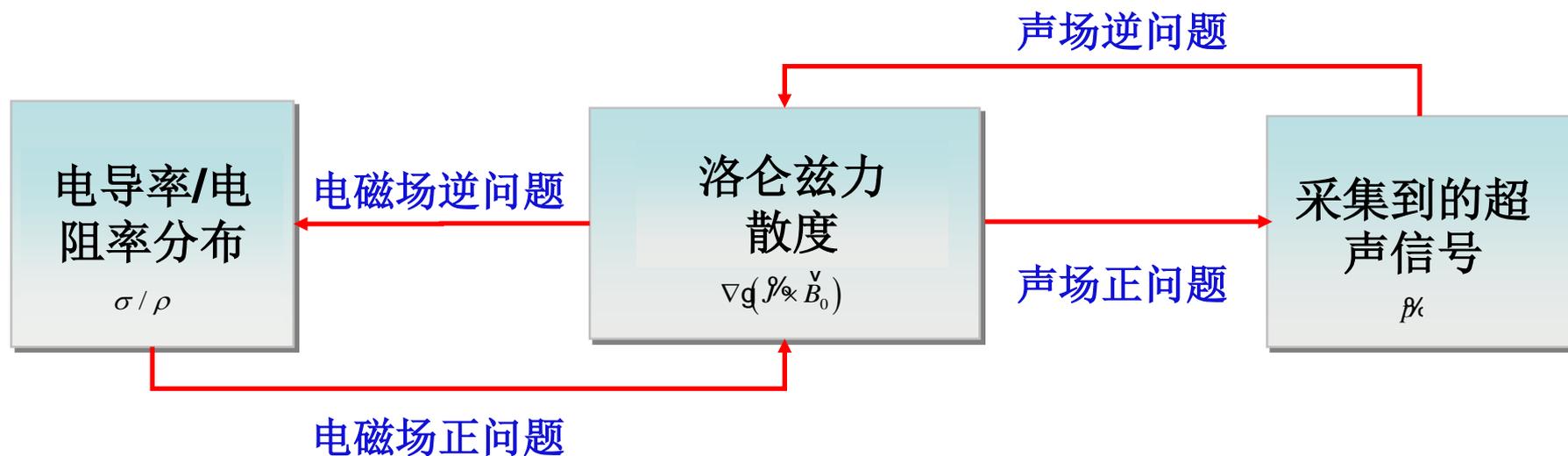
2 关键问题与理论分析

3 仿真成果分析

4 工作展望



磁声成像技术的关键问题与理论分析



磁声成像技术的关键问题与理论分析



电磁场正问题分析



电磁场逆问题分析



声场正问题分析

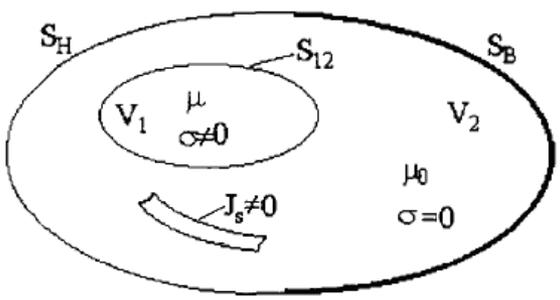


声场逆问题分析



电磁场正问题分析

瞬态电磁场边分析的通用方法 ——矢量磁位-标量电位法 (A-Φ法)



$$\left. \begin{aligned} & \nabla \times \nu \nabla \times \mathbf{A} - \nabla(\nu \nabla \cdot \mathbf{A}) + \sigma \nabla \phi + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_s && \text{在 } V_1 \text{ 区} \\ & \nabla \cdot \left(-\sigma \nabla \phi - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 && \text{在 } V_1 \text{ 区} \\ & \left. \begin{aligned} & \mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0 \\ & \nu \nabla \cdot \mathbf{A} = 0 \end{aligned} \right\} && \text{在 } S_B \text{ 上} \\ & \left. \begin{aligned} & \nu \nabla \times \mathbf{A} \times \mathbf{n} = 0 \\ & \mathbf{n} \cdot \mathbf{A} = 0 \end{aligned} \right\} && \text{在 } S_H \text{ 上} \\ & \left. \begin{aligned} & \mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_2 \\ & \nu_1 \nabla \cdot \mathbf{A}_1 = \nu_2 \nabla \cdot \mathbf{A}_2 \\ & \nu_1 \nabla \times \mathbf{A}_1 \times \mathbf{v}_{12} = \nu_2 \nabla \times \mathbf{A}_2 \times \mathbf{v}_{12} \\ & \mathbf{n} \cdot \left(-\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla \phi \right) = 0 \end{aligned} \right\} && \text{在 } S_{12} \text{ 上} \end{aligned}$$

电磁场正问题分析

A-Φ法

采用伽辽金形式的加权余量法，可建立对应瞬态电磁场边值问题的有限元离散化方程，用矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} \int_V [\nu \nabla \times \mathbf{N}_j \cdot \nabla \times () + \nu \lambda \nabla \cdot \mathbf{N}_j \cdot ()] dv & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \phi \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \int_V \sigma \mathbf{N}_j \cdot () dv & \int_V \sigma \mathbf{N}_j \cdot \nabla () dv \\ \int_{V_1} \sigma \mathbf{N}_j \cdot () dv & \int_{V_1} \sigma \mathbf{N}_j \cdot \nabla () dv \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_V \mathbf{N}_j \cdot \mathbf{J}_s dv \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{令 } \phi = \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{A}\} + [\mathbf{D}]\frac{\partial}{\partial t}\{\mathbf{A}\} = \{\mathbf{F}\}$$

采用两点差分步法

$$\left[\theta \mathbf{K}^{n+1} + \frac{\mathbf{D}}{\Delta t} \right] \{\mathbf{A}^{n+1}\} = \theta \{\mathbf{F}^{n+1}\} + (1-\theta)\{\mathbf{F}^n\} + \left[\frac{\mathbf{D}}{\Delta t} - (1-\theta)\mathbf{K}^n \right] \{\mathbf{A}^n\}$$



电磁场正问题分析

A-Φ法

$$A = [A_x \quad A_y \quad A_z \quad \varphi]^T$$

$$B_x^e = \sum_{k=1}^g \left(\frac{\partial N_k^e}{\partial y} A_{kz} - \frac{\partial N_k^e}{\partial z} A_{ky} \right)$$

$$B_y^e = \sum_{k=1}^g \left(\frac{\partial N_k^e}{\partial z} A_{kx} - \frac{\partial N_k^e}{\partial x} A_{kz} \right)$$

$$B_z^e = \sum_{k=1}^g \left(\frac{\partial N_k^e}{\partial x} A_{ky} - \frac{\partial N_k^e}{\partial y} A_{kx} \right)$$

$$J_x^e = -\sigma_e \sum_{k=1}^g \left(\frac{\partial N_k^e}{\partial t} A_{kz} + \frac{\partial N_k^e}{\partial x} \varphi_k \right)$$

$$J_y^e = -\sigma_e \sum_{k=1}^g \left(\frac{\partial N_k^e}{\partial t} A_{kx} + \frac{\partial N_k^e}{\partial y} \varphi_k \right)$$

$$J_z^e = -\sigma_e \sum_{k=1}^g \left(\frac{\partial N_k^e}{\partial t} A_{ky} + \frac{\partial N_k^e}{\partial z} \varphi_k \right)$$

$$B = [B_x \quad B_y \quad B_z]^T$$

$$J = [J_x \quad J_y \quad J_z]^T$$

$$\nabla \cdot (J \times B)$$

优点：对于任意电导率的导电介质均适用

缺点：待求解量大，计算效率低



电磁场正问题分析

标量电位法

$$\nabla \times \mathbf{A}_1 = \mathbf{B}_1$$



\mathbf{B}_1 只有Z方向分量

$$\mathbf{E} = -\mathbf{A}_1 - \nabla \phi$$

$$\nabla \mathbf{g} \mathbf{A}_1 = 0$$



$$\mathbf{J} = -\sigma \mathbf{A}_1 - \sigma \nabla \phi$$



$$\mathbf{A}_1 = \frac{1}{2} B_1 (-(y - \alpha) \mathbf{e}_x + x \mathbf{e}_y)$$

$$\nabla \mathbf{g} (-\sigma \mathbf{A}_1 - \sigma \nabla \phi) = 0$$



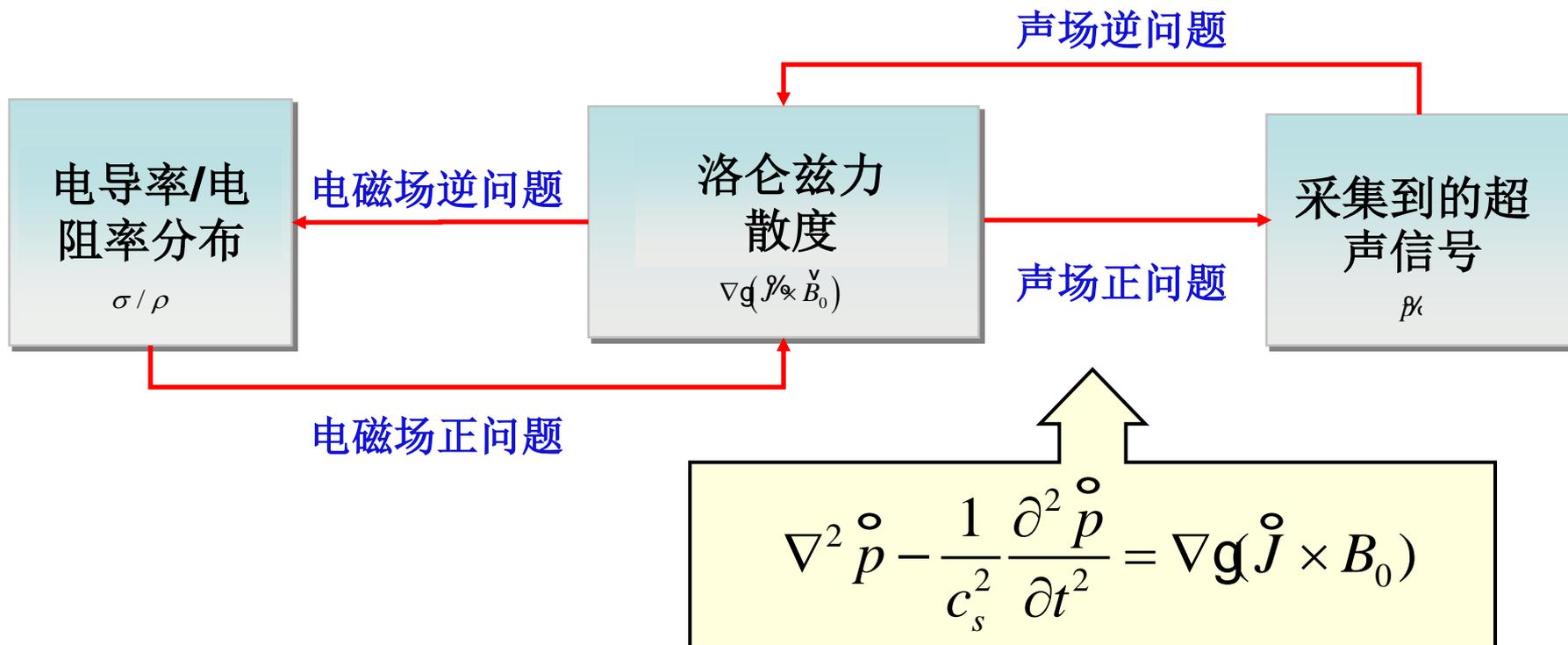
$$\nabla \mathbf{g} (\sigma \nabla \phi) = -\nabla \mathbf{g} (\sigma \mathbf{A}_1)$$

只需求解标量电位的边值问题

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \mathbf{g} (\sigma \nabla \phi) = -\nabla \mathbf{g} (\sigma \mathbf{A}_1) \\ (\sigma_2 \mathbf{A}_1 \mathbf{g} + \sigma_2 \frac{\partial \phi}{\partial n})|_{\Gamma} = (\sigma_1 \mathbf{A}_1 \mathbf{g} + \sigma_1 \frac{\partial \phi}{\partial n})|_{\Gamma} \\ (\mathbf{A}_1 \mathbf{g} + \frac{\partial \phi}{\partial n})|_{\partial \Omega_1} = 0 \end{array} \right.$$



声场正问题分析



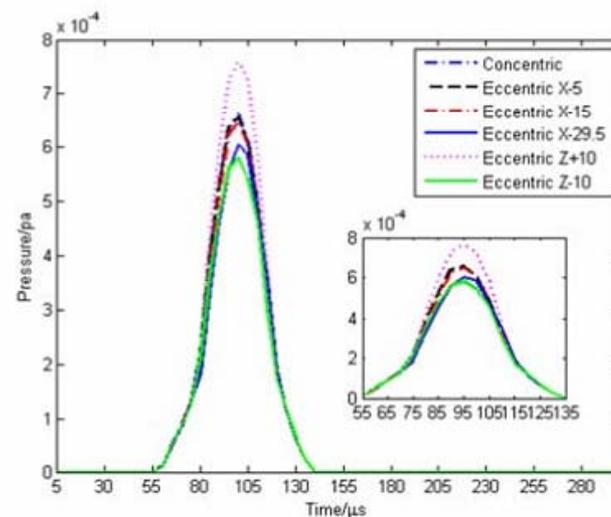
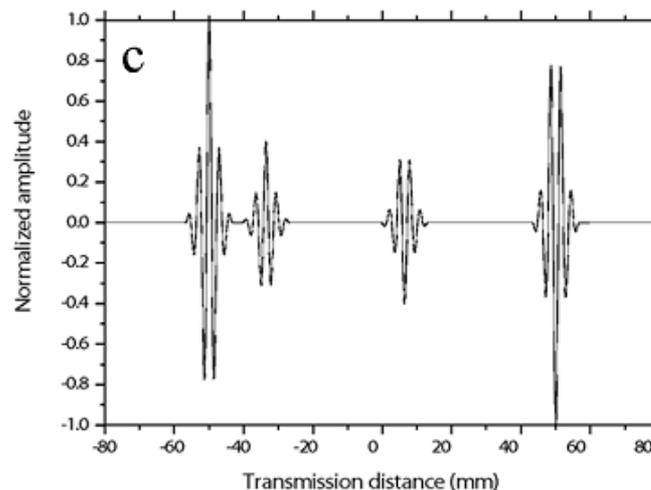


声场正问题分析

中国科学院·电工研究所

- 2007年，有学者提出：
引发的超声信号主要由电导率界面上的电导率差异产生，信号强度取决于电导率沿径向方向的微分
- 2009年，有学者提出：
在两种媒质边界上电导率不连续，在边界上，需要应用积分公式来解决

$$\int_V \nabla q (J \times B_0) dV = \int_S (J \times B_0) dS$$





核心：
解决电导率在边界上的
不连续性问题

声场正问题数值分析

消去质点速度 v

声压波动方程

$$\nabla^2 \overset{\circ}{p} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \overset{\circ}{p}}{\partial t^2} = \nabla \mathbf{g} \cdot \overset{\circ}{j} \times B_0$$

线性连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \nabla \mathbf{g} \cdot \mathbf{v}$$

线性运动方程：

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla p + \overset{\circ}{f}$$

线性物态方程：

$$p = c_s^2 \rho$$

声压-速度耦合方程

$$\begin{cases} \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial p}{\partial t} = -\rho_0 \nabla \mathbf{g} \cdot \mathbf{v} \\ \rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla p + \overset{\circ}{f} \end{cases}$$



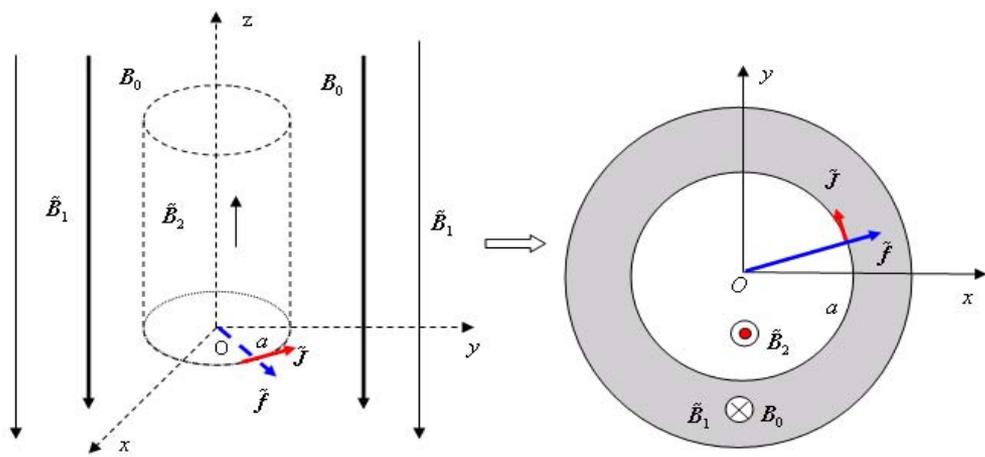
速度波动方程

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} - \rho_0 c_s^2 \nabla \nabla \mathbf{g} \cdot \mathbf{v} = \frac{\partial \overset{\circ}{f}}{\partial t}$$



消去声压 p

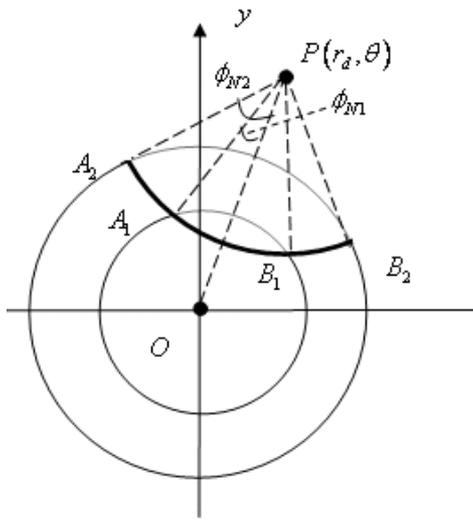
声场正问题解析分析



$$\nabla^2 \beta_0 - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \beta_0}{\partial t^2} = \nabla \mathbf{g} (\mathbf{J} \times \mathbf{B}_0) g(t)$$

$$g(t) = \delta(t)$$

$$\beta_0(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{4\pi} \nabla_r \cdot \int_{V_0} \tilde{\mathbf{N}} r_0 f(r_0) \frac{\delta(t - R/c_s)}{R}$$

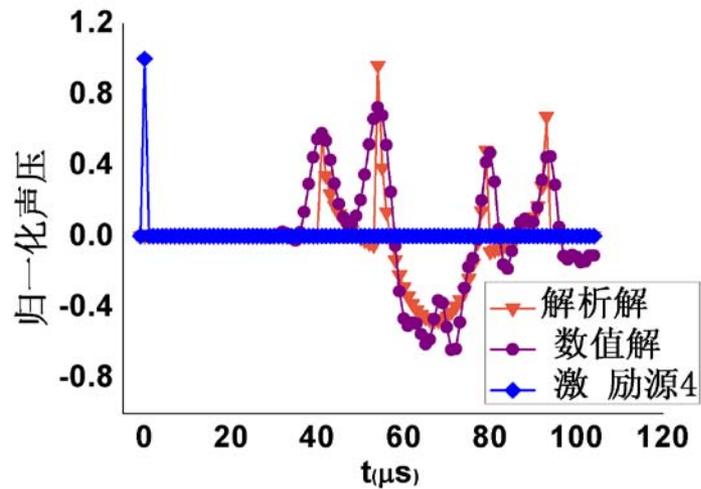
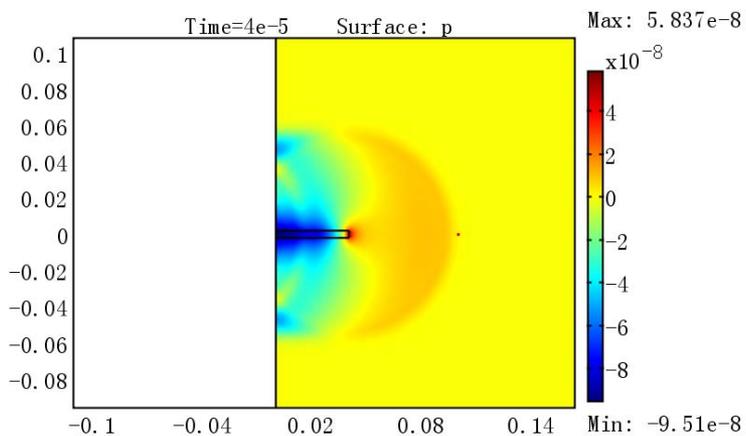
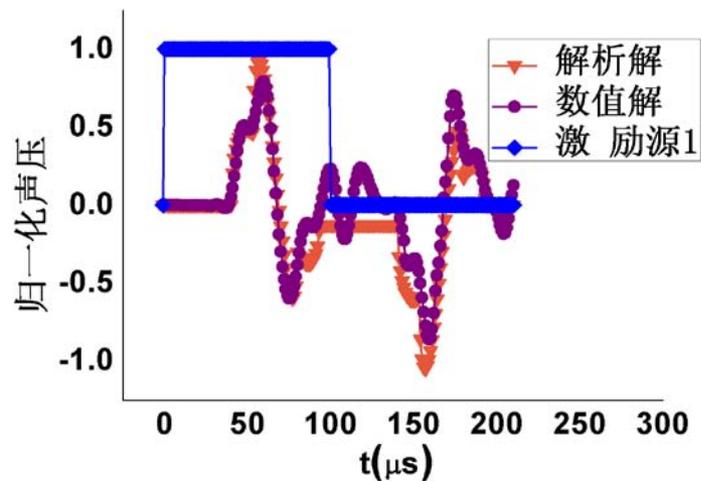
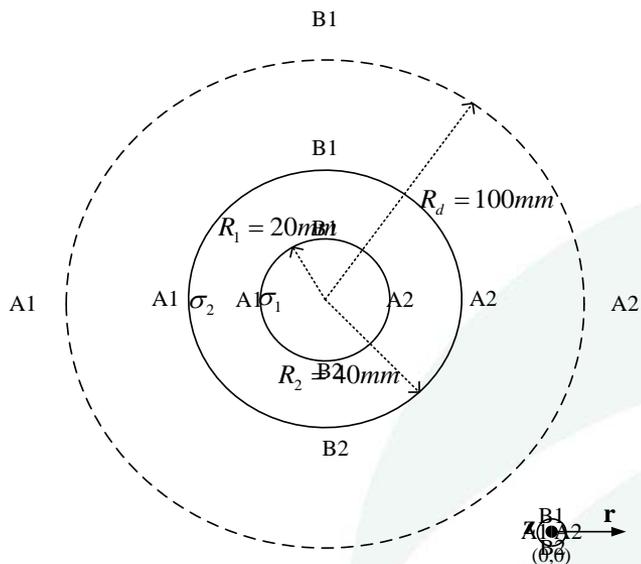


$$\sigma(r) = \begin{cases} \sigma_1 & 0 < r \leq a_1 \\ \sigma_2 & a_1 < r \leq a_2 \\ 0 & r > a_2 \end{cases}$$

$$\beta(\mathbf{r}, t) = \beta_0(\mathbf{r}, t) * g(t)$$

$$\beta_0(r_d) = -\frac{1}{4\pi} B_0 B_1 \begin{cases} \sigma_2 \left[\frac{(R \cos \phi_{N1} - r_d)^2}{R r_d \sin \phi_{N1}} - 2\phi_{N1} \right] + (\sigma_1 - \sigma_2) \left[\frac{(R \cos \phi_{N2} - r_d)^2}{R r_d \sin \phi_{N2}} - 2\phi_{N2} \right] & t \in \Sigma(a_2) \\ 0 & t \notin \Sigma(a_2) \end{cases}$$

声场正问题仿真分析



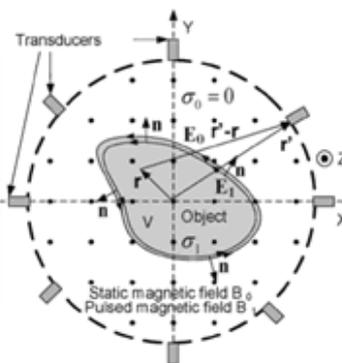
声场逆问题分析

超声信号 → 洛伦兹力密度散度

超声信号 → 时间反转场

时间反转场 → 洛伦兹力密度散度

根据时间反转算法的相关理论，对于二维问题而言，记位于点 r_d 的探头 t 时刻测量到的声压为 $\tilde{p}_0(r_d, t)$ ，点 r 的时间反转场为



时间反转场与源之间的关系可以得到洛伦兹力密度散度的重建公式为

$$\tilde{p}_r(r, t) = \frac{1}{2\pi} \oint_{\Sigma} dS_d \frac{\mathbf{n} \cdot (\mathbf{r}_d - \mathbf{r})}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_d|^2} \left[\frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_d|} \tilde{p}_0(\mathbf{r}_d, t_{rd}) - \frac{\tilde{p}'_0(\mathbf{r}_d, t_{rd})}{c_s} \right] \nabla \cdot (\mathbf{J} \times \mathbf{B}_0) = -\frac{1}{2\pi c_s^3} \iint_{\Sigma} dS_d \frac{\mathbf{n} \cdot (\mathbf{r}_d - \mathbf{r})}{|\mathbf{r}_d - \mathbf{r}|^2} \tilde{p}_0\left(\mathbf{r}_d, \frac{|\mathbf{r}_d - \mathbf{r}|}{c_s}\right)$$

电磁场逆问题分析

当考虑脉冲磁场的瞬态特性并考虑二次磁场时

$$\mathbf{J} = -\sigma \mathbf{A}_1 - \sigma \nabla \phi$$

$$\nabla \times [\sigma (\mathbf{A}_1 + \nabla \phi)]|_z = -\nabla \times \mathbf{J}|_z$$

$$(\nabla \sigma \times \mathbf{A}_1)|_z + (\nabla \sigma \times \nabla \phi)|_z + \sigma B_1 = -\nabla \times \mathbf{J}|_z$$

1

标量电位法

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \Big|_z &= -\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \Big|_z \\ \nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) &= -\nabla \cdot \mathbf{g}(\sigma \mathbf{A}_1) \end{aligned} \right\}$$

2

主要内容



报告内容

1 背景及意义

2 关键问题与理论分析

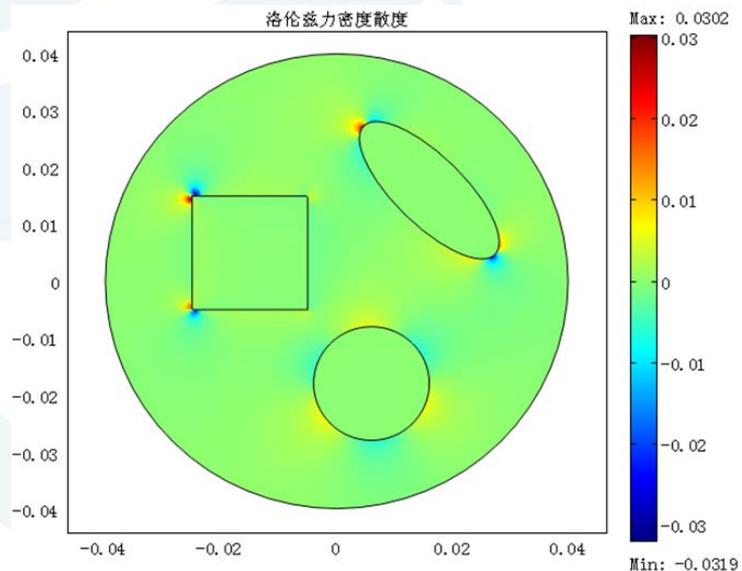
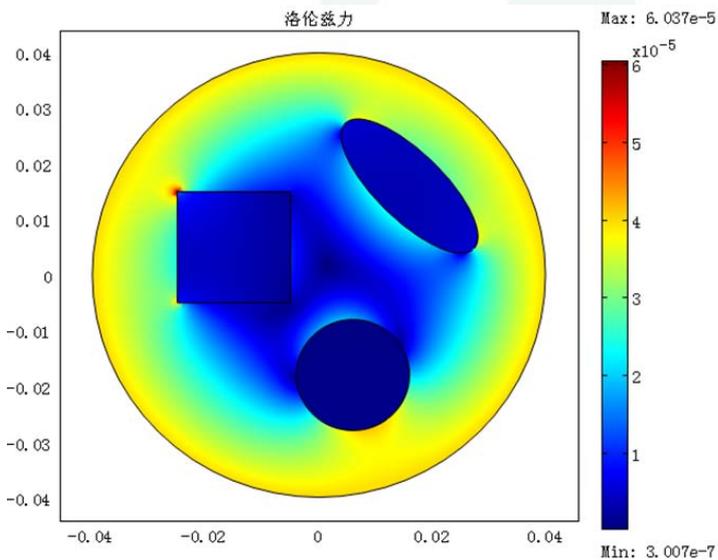
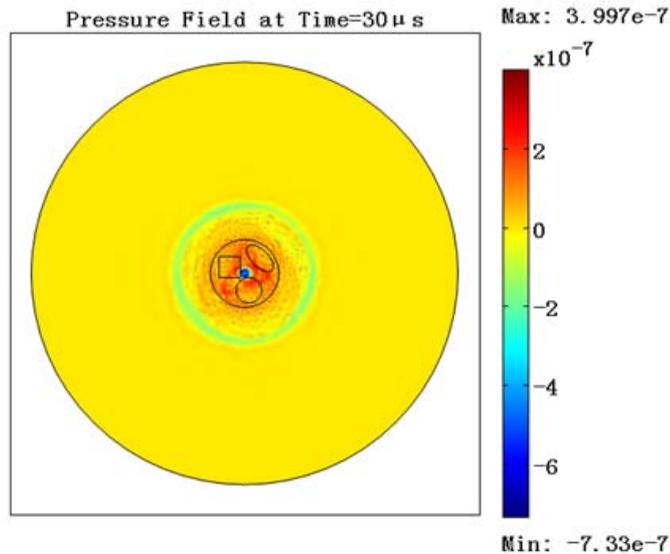
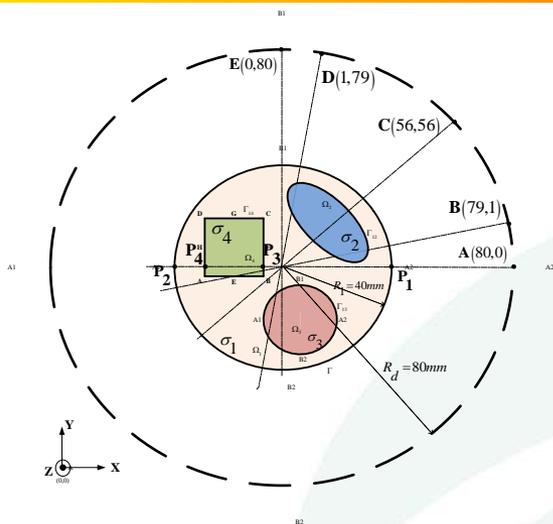
3 仿真成果分析

4 工作展望



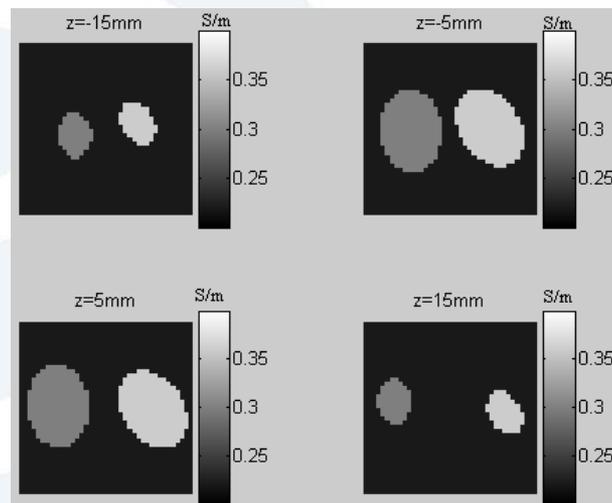
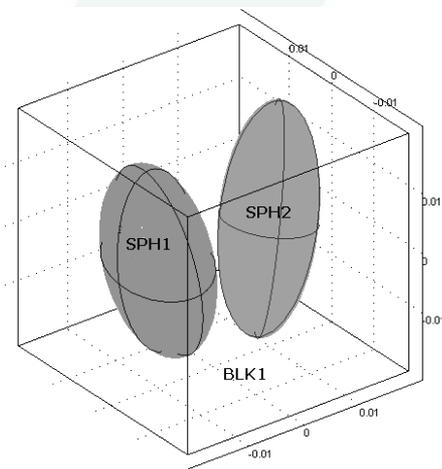


声场仿真成果分析



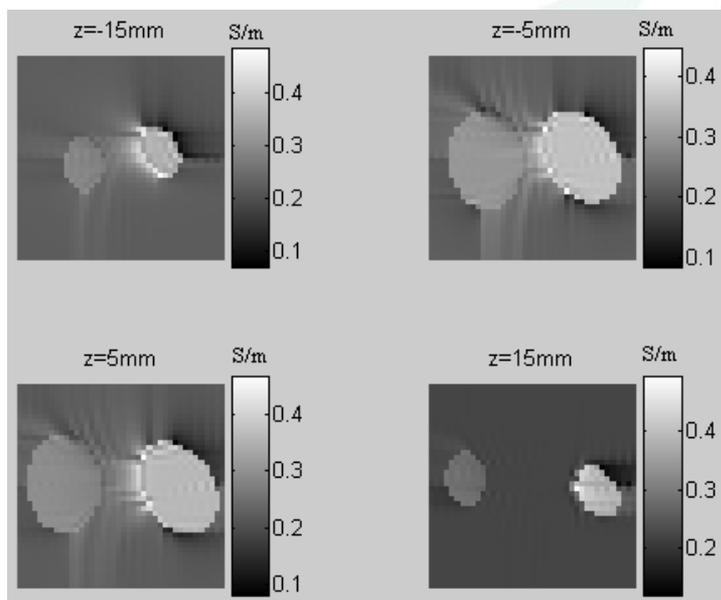
电磁场仿真成果分析

在直角坐标系下，该模型分为3个子区域，BLK1为一个 $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 的正方体背景区域，电导率为 0.2S/m 。SPH1，SPH2分别为电导率为 0.4S/m ， 0.3S/m 的倾斜椭球体，互不相交，包裹在正方体内部。

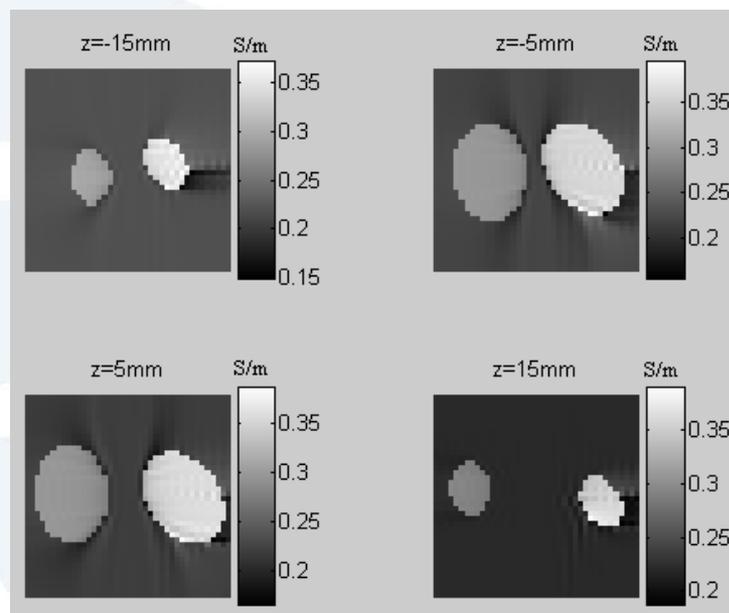


初始电导率、有限差分步长与前面相同，利用代数迭代法进行了逆问题重建，这里显示沿z轴方向由下到上均匀选取的四个横截面： $z=-15\text{mm}$ ， $z=-5\text{mm}$ ， $z=5\text{mm}$ ， $z=15\text{mm}$ 上的电导率重建结果

电磁场仿真成果分析



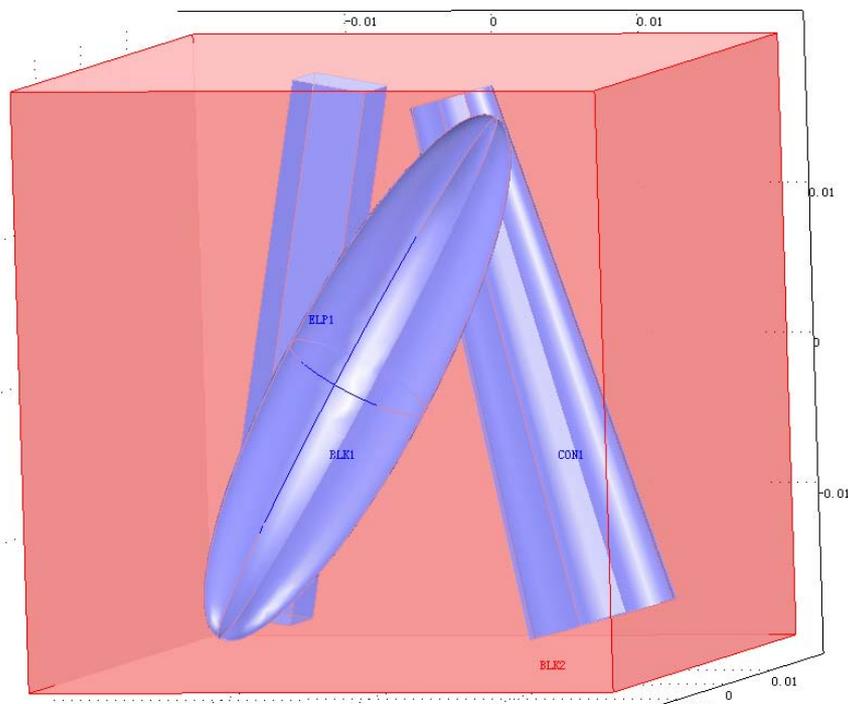
(a) 1次迭代后得到的电导率分布



(b) 5次迭代后得到的电导率分布

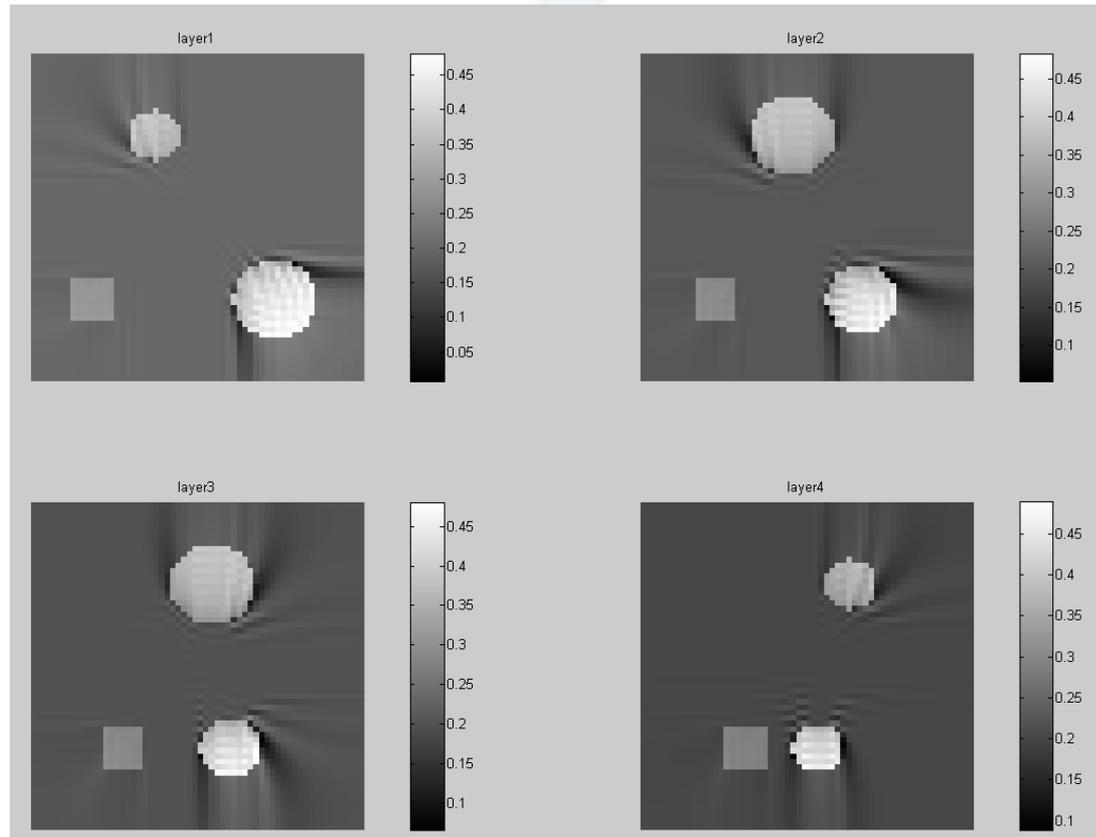


电磁场仿真成果分析



模型由一个方体、一个椭球、一个圆台和一个六面体组成，方块体的长、宽、高均为0.04m，椭球半径为0.005m，高度为0.04m，圆台的底部半径为0.05m，高度为0.036m，六面体的楞长分别为0.005 m，0.005 m和0.036 m，方块体电导率为0.1S/m，六面体、椭球和圆台的电导率分别为0.4S/m，0.6S/m、0.8S/m。

电磁场仿真成果分析





**报告
内容**

1 背景及意义

2 关键问题与理论分析

3 仿真成果分析

4 工作展望





在逆问题方面，完成电磁场与声场的衔接工作，建立三维模型，利用断层成像法，由接收到的声信号重建出电导率分布图,并进一步进行误差分析和抗噪性能评估



中科院电工所前沿部，主要从事多场智能探测、新型成像、环境能捕获与无线传感网络、电磁场正逆问题、多物理场耦合问题、新型发电与输电变电技术等方面的研究。

网址：<http://iee.ac.cn/cn/qyts.php>





谢谢