



(10) 申请公布号 CN 104473639 A

(21) 申请号 201410771518.5

(22) 申请日 2014.12.14

(71) 申请人 中国科学院电工研究所

地址 100190 北京市海淀区中关村北二条 6 号

(72)发明人 刘国强 夏慧 李士强 夏正武  
杨延菊 刘宇

(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限公司 11251

代理人 关玲

(51) Int. Cl.

*A61B 5/053*(2006.01)

A61B 8/00(2006.01)

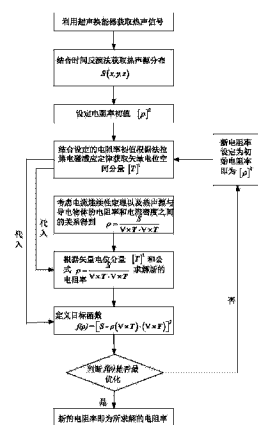
权利要求书2页 说明书4页 附图1页

## (54) 发明名称

# 一种基于最优化迭代算法的磁热声成像电阻率重建方法

(57) 摘要

一种基于最优化迭代算法的磁热声成像电阻率重建方法,激励线圈在导电物体上产生电磁热声信号,超声换能器接收电磁热声信号,经超声信号处理、采集子系统对信号处理,控制电路控制电流激励源、超声换能器和超声信号处理、采集子系统的同步。超声换能器电磁热声信号进行断层圆周扫描,获取每个断层圆周上的电磁超声信号,最后结合图像重建算法实现电阻率图像的重建。电阻率图像重建方法首先定义一个满足热声源、电阻率、一次磁失位空间分量和标量电位空间分量的目标函数,在热声源分布已知的情况下,根据电流连续性定理,求解标量电位的空间分量,然后将标量电位的空间分量和磁失位空间分量代入目标函数,重建电阻率的分布。



1. 一种基于最优化迭代算法的磁热声成像电阻率重建方法,其特征在于:所述的基于最优化迭代算法的磁热声成像电阻率重建方法为:

第一步利用超声换能器获取导电物体各个断层的热声信号,在每一个断层,超声换能器在超声换能器扫描控制器的控制下,扫描一周获取该断层上的所有热声信号;第二步根据磁热声的声压波动方程,利用时间反演法获取导电物体每个断层上的热声源分布;第三步对导电物体的电阻率进行空间离散,设定电阻率的初值;第四步根据欧姆定律,利用线性有限元方法重建得到导电物体的矢量电位空间分量;第四步根据热声源分布与导电物体电流密度之间的关系,再结合电流连续性定理,获取热声源函数电阻率和矢量电位空间分量三者之间满足的方程式,并定义热声源函数、电阻率和矢量电位空间分量三者之间满足的目标函数;第五步将第三步求解的矢量电位空间分量代入目标函数,利用目标函数最小化原则,求解导电物体的电阻率分布。

2. 按照权利要求 1 所述的基于最优化迭代算法的磁热声成像电阻率重建方法,其特征在于:所述的基于最优化迭代算法的磁热声成像电阻率重建方法的具体步骤如下:

第一步:获取导电物体热声信号:

MHz 电流激励源通过激励线圈将 MHz 电流作用到导电物体上,导电物体由于感应电流的作用产生焦耳热,进而产生热声信号;热声信号通过耦合剂耦合到超声换能器内,导电物体和超声换能器均置于水槽的耦合剂内;超声换能器接收到超声信号后通过超声信号处理、采集子系统进行前置放大、滤波、二级放大处理后,在经过门积分器进行有限宽度的积分,获取高信噪比的热声信号,并进行存储;

第二步:求解导电物体热声源分布:

根据磁热声的声压耦合方程,利用时间反演法求解热声源分布:

$$S(\mathbf{r}) \approx -\frac{I}{2\pi c_s} \frac{C_p}{\beta} \oint_{S_d} dS_d \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_R}{R} p'(\mathbf{r}, |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|/c_s), \quad (1)$$

其中: $R = |\mathbf{r}' - \mathbf{r}|$ ,  $\mathbf{e}_R = \frac{\mathbf{R}}{R}$ ,  $C_p$  为导电物体的比热容,  $\mathbf{r}'$  是超声换能器的位置坐标,  $S_d$  是超声换能器所在的平面,  $p(\mathbf{r}, t)$  是声压,  $c_s$  为热声源在介质中的传播声速,  $\mathbf{r}$  为热声源的位置坐标,  $\beta$  为导电物体的热膨胀系数,  $p'$  是声压对时间的一阶导数,  $\mathbf{n}$  是  $\mathbf{r}'$  位置  $S_d$  的单位法线矢量,  $S(\mathbf{r})$  为热声源分布;

选取导电物体的某一断层面  $z = z_0$ , 断层面上的热声源  $S(x, y, z_0)$  通过公式 (1) 得出, 导电物体上的所有的热声源  $S(x, y, z)$  通过断层数据  $S(x, y, z_0)$  在  $z$  方向的插值得到;

第三步:获取矢量电位空间分量:

因为热声源同时与导电物体的电阻率和电流密度相关,因此热声源函数满足:

$$S = \rho J^2 = \rho \mathbf{J} \cdot \mathbf{J} \quad (2)$$

其中  $S$  为热声源函数,  $\mathbf{J}$  为导电物体的电流密度,  $\rho$  为导电物体的电阻率;

考虑电流连续性定理  $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ , 引入矢量电位  $\mathbf{T}$ , 有:

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T} \quad (3)$$

根据法拉第电磁感应定律得出:

$$\nabla \times \rho \nabla \times \mathbf{T} = -\mathbf{B}_1 \quad (4)$$

其中,  $\rho$  为电阻率,  $B_1$  为磁通密度;

对导电物体进行空间离散, 并给出电阻率的初值  $[\rho]^0$ , 将电阻率的初值  $[\rho]^0$  代入公式 (4) 中, 考虑在成像体的边界施加电绝缘边界条件, 采用有限元方法求解矢量电位空间分量  $[T]^1$ ;

第四步: 定义目标函数:

由式 (3) 代入式 (2), 可得:

$$\rho = \frac{S}{\nabla \times \mathbf{T} \cdot \nabla \times \mathbf{T}} \quad (5)$$

根据公式 (5) 定义目标函数:

$$f(\rho) = [S - \rho(\nabla \times \mathbf{T}) \cdot (\nabla \times \mathbf{T})]^2 \quad (6)$$

第五步: 目标函数最优化迭代求解:

将第三步求解得到的矢量电位空间分量  $[T]^1$  代入目标函数, 通过最优化算法进行迭代求解, 直到满足最优条件得到最终的电阻率。

## 一种基于最优化迭代算法的磁热声成像电阻率重建方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种电阻率重建方法,特别涉及一种基于最优化迭代算法的磁热声成像电阻率重建方法。

### 背景技术

[0002] 目前传统电阻抗成像技术的灵敏度和空间分辨率不高,主要因为电阻抗成像通常采用频率较低的电磁波作为激励,由于波长远远大于成像体,导致电磁场探测对比度高,但分辨率低。毋庸置疑,单一场都有其物理局限性。因此多物理场成像技术受到越来越多的关注,即将一种物理场作用于生物组织,转换为另一种物理场进行检测,由一种物理场提供分辨率,另一种物理场提供对比度,实现对比度和分辨率的同时提高。电磁场和超声相结合的多物理场成像技术正是考虑到电磁场对人体组织电阻率的高对比度和超声波探测的高分辨率特性,成为人们的研究热点,磁热声成像作为一种新型的多物理场成像技术最近一年受到重视。

[0003] 磁热声成像是由新加坡南洋理工大学在 2013 年首次提出的新型的电阻抗成像方法,通过对导电物体施加低于 20MHz 的交变磁场,在导电物体内部产生感应电场,进而产生焦耳热,激发热弹性的声信号,检测声信号进行成像。该方法是一种以交变磁场作为激励源,基于生物组织内部焦耳热吸收率的差异,以超声作为信息载体的无损生物医学影像技术。与微波热声成像技术相比,激励源的频率降低,可以深入到导电体的更深处,使磁热声图像扩展到人体组织的深层。由测量的超声信号到电阻率的重建分为两个过程,首先由测量的超声信号重建热声源分布,然后利用热声源分布重建电阻率分布,目前的相关文献和专利只重建了热声源 ( $S = \rho J^2$ ),这里  $E$  为电场强度的空间分量),而没有提及电阻率  $\rho$  的重建。显然,电场强度  $E$  与电阻率  $\rho$  的分布有关,从热声源  $S$  中重建出电阻率  $\rho$  是非常困难的。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的是克服现有的磁热声成像方法无法给出电阻率分布的不足,提出一种基于最优化迭代算法的磁热声成像电阻率重建方法,本发明基于最优化迭代算法,可以精确的重建导电物体的电阻率。

[0005] 本发明基于磁热声成像原理:利用激励线圈对导电物体施加 MHz 电流激励,在导电物体内部产生焦耳热,进而产生热声信号,利用超声换能器接收超声信号,对接收到的热声信号进行处理和采集,得到放大滤波后的热声信号后,采用电阻率重建算法获取导电物体的电阻率图像。

[0006] 本发明磁热声成像的电阻率重建方法共包括五个步骤:

[0007] 第一步利用超声换能器获取导电物体各个断层的热声信号,在每一个断层,超声换能器在超声换能器扫描控制器的控制下,扫描一周获取该断层上的所有热声信号;第二步根据磁热声的声压波动方程,利用时间反演法获取导电物体每个断层上的热声源分布;

第三步对导电物体的电阻率进行空间离散,设定电阻率的初值;第四步根据欧姆定律,利用线性有限元方法重建得到导电物体的矢量电位空间分量;第四步根据热声源分布与导电物体电流密度之间的关系,再结合电流连续性定理,获取热声源函数电阻率和矢量电位空间分量三者之间满足的方程式,并定义热声源函数、电阻率和矢量电位空间分量三者之间满足的目标函数;第五步将第三步求解的矢量电位空间分量代入目标函数,利用目标函数最小化原则,求解导电物体的电阻率分布。

[0008] 电阻率重建方法的具体步骤如下:

[0009] 第一步:获取导电物体热声信号

[0010] 首先,MHz 电流激励源通过激励线圈将 MHz 电流作用到导电物体上,导电物体由于感应电流的作用产生焦耳热,进而产生热声信号,热声信号通过耦合剂耦合到超声换能器内,导电物体和超声换能器均置于水槽的耦合剂内;超声换能器接收到超声信号后通过超声信号处理、采集子系统进行前置放大、滤波、二级放大处理后,在经过门积分器进行有限宽度的积分,获取高信噪比的热声信号,并进行存储;

[0011] 第二步:求解导电物体热声源分布

[0012] 根据磁热声的声压耦合方程,利用时间反演法求解热声源分布:

[0013]

$$S(\mathbf{r}) \approx -\frac{I}{2\pi c_s} \frac{C_p}{\beta} \oint_{S_d} dS_d \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_R}{R} p'(\mathbf{r}, |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|/c_s), \quad (1)$$

[0014] 其中  $R = |\mathbf{r}' - \mathbf{r}|$ ,  $\mathbf{e}_R = \frac{\mathbf{R}}{R}$ ,  $C_p$  为导电物体的比热容,  $\mathbf{r}'$  是超声换能器的位置坐标,

$S_d$  是超声换能器所在的平面,  $p(\mathbf{r}, t)$  是声压,  $c_s$  为热声源在介质中的传播声速,  $\mathbf{r}$  为热声源位置坐标,  $\beta$  为导电物体的热膨胀系数,  $p'$  是声压对时间的一阶导数,  $\mathbf{n}$  是  $\mathbf{r}'$  位置  $S_d$  的单位法线矢量,  $S(\mathbf{r})$  为热声源分布;

[0015] 选取导电物体的某一断层面  $z = z_0$ , 断层面的热声源  $S(x, y, z_0)$  已经通过公式 (1) 得出, 导电物体上的所有的热声源  $S(x, y, z)$  通过断层数据  $S(x, y, z_0)$  在  $z$  方向的插值得到。

[0016] 第三步:获取矢量电位空间分量

[0017] 因为热声源同时与导电物体的电阻率和电流密度相关, 因此热声源函数满足:

$$S = \rho J^2 = \rho \mathbf{J} \cdot \mathbf{J} \quad (2)$$

[0019] 其中,  $S$  为热声源函数,  $\mathbf{J}$  为导电物体的电流密度,  $\rho$  为导电物体的电阻率。

[0020] 考虑电流连续性定理  $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ , 引入矢量电位  $\mathbf{T}$ , 有:

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T} \quad (3)$$

[0022] 根据法拉第电磁感应定律得出:

$$\nabla \times \rho \nabla \times \mathbf{T} = -\mathbf{B}_1 \quad (4)$$

[0024] 其中,  $\rho$  为电阻率,  $\mathbf{B}_1$  为磁通密度,  $\nabla$  为哈密顿算符。

[0025] 对导电物体进行空间离散, 并给出电阻率的初值  $[\rho]^0$ , 将电阻率初值  $[\rho]^0$  代入公式 (4) 中, 考虑在成像体的边界施加电绝缘边界条件, 采用有限元方法求解矢量电位空间分量  $[\mathbf{T}]^1$ 。

[0026] 第四步：定义目标函数

[0027] 由式 (3) 代入式 (2)，得到：

$$[0028] \quad \rho = \frac{S}{\nabla \times \mathbf{T} \cdot \nabla \times \mathbf{T}} \quad (5)$$

[0029] 根据公式 (5) 定义目标函数  $f(\rho)$ ：

$$[0030] \quad f(\rho) = [S - \rho(\nabla \times \mathbf{T}) \cdot (\nabla \times \mathbf{T})]^2 \quad (6)$$

[0031] 第五步：目标函数最优化迭代求解

[0032] 将第三步求解得到的矢量电位空间分量  $[\mathbf{T}]^1$  代入目标函数，通过最优化算法进行迭代求解，直到满足最优条件得到最终的电阻率。

## 附图说明

[0033] 图 1 本发明重建方法重建原理示意图。

## 具体实施方式

[0034] 以下结合附图和具体实施方式进一步说明本发明。

[0035] 本发明所述的一种基于最优化迭代算法的磁热声成像的电阻率重建方法共包括五个步骤，第一步利用超声换能器获取导电物体各个断层的热声信号，超声换能器在超声换能器扫描控制器的控制下，在每一个断层或者各个断层上一周扫描热声信号；第二步根据磁热声的声压波动方程，利用时间反演法获取导电物体每个断层上的热声源分布；第三步对导电物体的电阻率进行空间离散，设定电阻率的初值；第四步根据欧姆定律，利用线性有限元方法重建得到导电物体的矢量电位空间分量；第四步根据热声源分布与导电物体电流密度之间的关系，再结合电流连续性定理，获取热声源函数电阻率和矢量电位空间分量三者之间满足的方程式，并定义热声源函数、电阻率和矢量电位空间分量三者之间满足的目标函数；第五步将第三步求解的矢量电位空间分量代入目标函数，利用目标函数最小化原则，求解导电物体的电阻率分布。

[0036] 具体步骤描述如下：

[0037] 第一步：获取导电物体热声信号

[0038] MHz 电流激励源通过激励线圈 MHz 电流作用到导电物体上，导电物体由于感应电流的作用产生焦耳热，进而产生热声信号，热声信号通过耦合剂耦合到超声换能器内，导电物体和超声换能器均置于水槽的耦合剂内；超声换能器接收到超声信号后通过超声信号处理、采集子系统进行前置放大、滤波、二级放大处理后，在经过门积分器进行有限宽度的积分，获取高信噪比的热声信号，并进行存储；

[0039] 第二步：导电物体热声源分布的求解

[0040] 根据磁热声的声压耦合方程，利用时间反演法求解热声源分布：

[0041]

$$S(\mathbf{r}) \approx -\frac{I}{2\pi c_s} \frac{C_p}{\beta} \oint_{\Sigma} dS_d \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_R}{R} p'(\mathbf{r}, |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|/c_s), \quad (1)$$

[0042] 其中： $R = |\mathbf{r}' - \mathbf{r}|$ ,  $\mathbf{e}_R = \frac{\mathbf{R}}{R}$ ,

[0043]  $C_p$ 为导电物体的比热容,  $\mathbf{r}'$  是超声换能器的位置坐标,  $S_d$ 是超声换能器所在的平面,  $p(\mathbf{r}, t)$  是声压,  $c_s$ 为热声源在介质中的传播声速,  $\mathbf{r}$  为热声源的位置坐标,  $\beta$  为导电物体的热膨胀系数,  $p'$  是声压对时间的一阶导数,  $\mathbf{n}$  是  $\mathbf{r}'$  位置  $S_d$  的单位法线矢量,  $S(\mathbf{r})$  为热声源分布。

[0044] 选取导电物体的某一断层面  $z = z_0$ , 断层面上的热声源  $S(x, y, z_0)$  已经通过公式 (1) 得出, 导电物体上的所有热声源  $S(x, y, z)$  通过断层数据  $S(x, y, z_0)$  在  $z$  方向的插值得到。

[0045] 第三步: 获取矢量电位空间分量

[0046] 因为热声源同时与导电物体的电阻率和电流密度相关, 因此热声源函数满足:

$$[0047] \quad S = \rho J^2 = \rho \mathbf{J} \cdot \mathbf{J} \quad (2)$$

[0048] 其中  $S$  为热声源函数,  $\mathbf{J}$  为导电物体的电流密度,  $\rho$  为导电物体的电阻率;

[0049] 考虑电流连续性定理  $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ , 引入矢量电位  $\mathbf{T}$ , 有:

$$[0050] \quad \mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T} \quad (3)$$

[0051] 根据法拉第电磁感应定律得出:

$$[0052] \quad \nabla \times \rho \nabla \times \mathbf{T} = -\mathbf{B}_1 \quad (4)$$

[0053] 其中,  $\rho$  为电阻率,  $\mathbf{B}_1$  为磁通密度。

[0054] 对导电物体进行空间离散, 并给出电阻率的初值  $[\rho]^0$ , 将  $[\rho]^0$  代入公式 (4) 中, 考虑在成像体的边界施加电绝缘边界条件, 采用有限元方法求解矢量电位空间分量  $[\mathbf{T}]^1$ 。

[0055] 第四步: 定义目标函数

[0056] 由式 (3) 代入式 (2), 可得:

$$[0057] \quad \rho = \frac{S}{\nabla \times \mathbf{T} \cdot \nabla \times \mathbf{T}} \quad (5)$$

[0058] 根据公式 (5) 定义目标函数:

$$[0059] \quad f(\rho) = [S - \rho(\nabla \times \mathbf{T}) \cdot (\nabla \times \mathbf{T})]^2 \quad (6)$$

[0060] 第五步: 目标函数最优化迭代求解

[0061] 将第三步求解得到的矢量电位空间分量  $[\mathbf{T}]^1$  代入目标函数, 通过最优化算法进行迭代求解, 直到满足最优条件得到最终的电阻率。

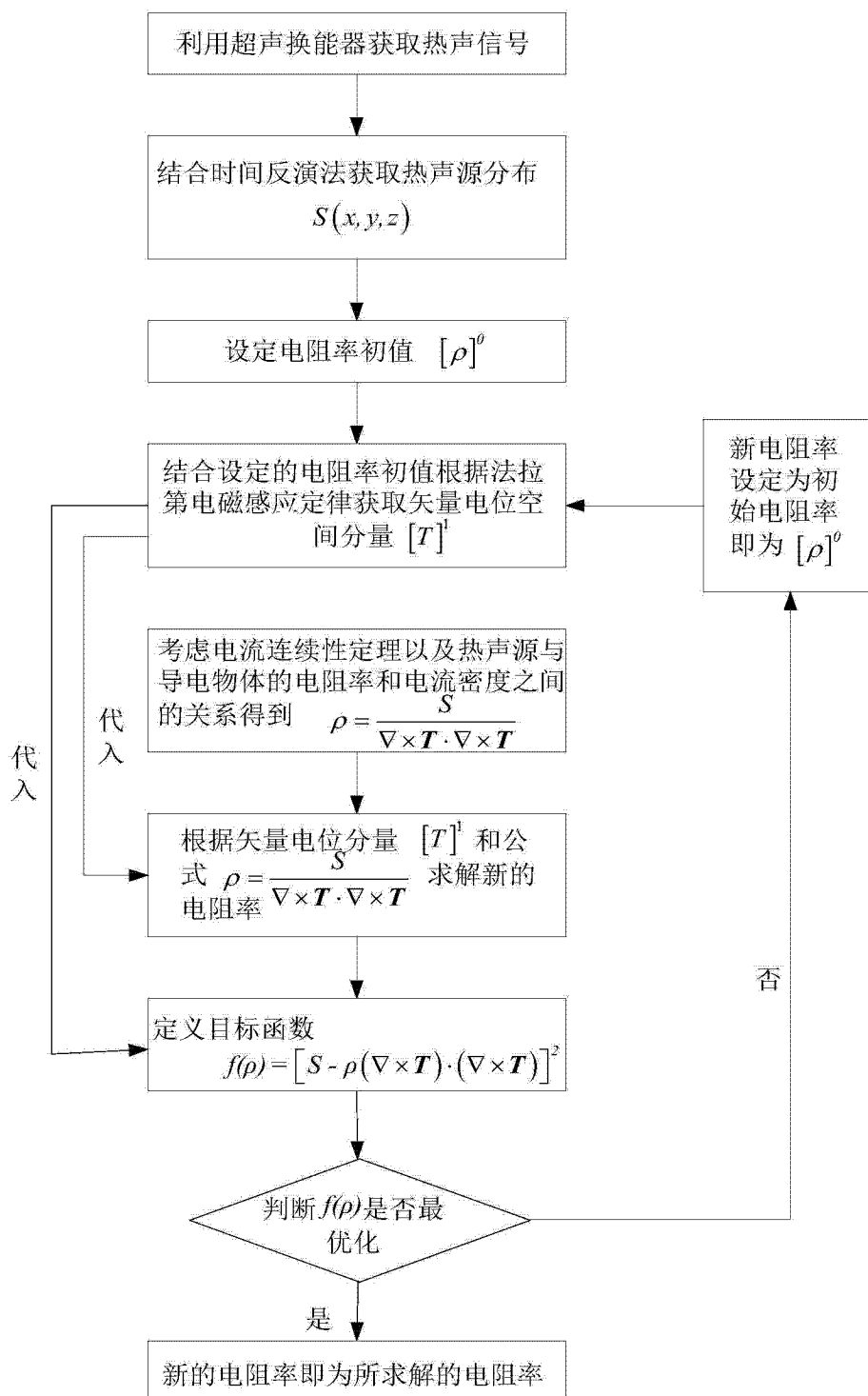


图 1

|                |                                                |         |            |
|----------------|------------------------------------------------|---------|------------|
| 专利名称(译)        | 一种基于最优化迭代算法的磁热声成像电阻率重建方法                       |         |            |
| 公开(公告)号        | <a href="#">CN104473639A</a>                   | 公开(公告)日 | 2015-04-01 |
| 申请号            | CN201410771518.5                               | 申请日     | 2014-12-14 |
| [标]申请(专利权)人(译) | 中国科学院电工研究所                                     |         |            |
| 申请(专利权)人(译)    | 中国科学院电工研究所                                     |         |            |
| 当前申请(专利权)人(译)  | 中国科学院电工研究所                                     |         |            |
| [标]发明人         | 刘国强<br>夏慧<br>李士强<br>夏正武<br>杨延菊<br>刘宇           |         |            |
| 发明人            | 刘国强<br>夏慧<br>李士强<br>夏正武<br>杨延菊<br>刘宇           |         |            |
| IPC分类号         | A61B5/053 A61B8/00                             |         |            |
| CPC分类号         | A61B5/0093 A61B5/053 A61B8/0833                |         |            |
| 代理人(译)         | 关玲                                             |         |            |
| 其他公开文献         | CN104473639B                                   |         |            |
| 外部链接           | <a href="#">Espacenet</a> <a href="#">SIPO</a> |         |            |

# 摘要(译)

一种基于最优化迭代算法的磁热声成像电阻率重建方法，激励线圈在导电物体上产生电磁热声信号，超声换能器接收电磁热声信号，经超声信号处理、采集子系统对信号处理，控制电路控制电流激励源、超声换能器和超声信号处理、采集子系统的同步。超声换能器电磁热声信号进行断层圆周扫描，获取每个断层圆周上的电磁超声信号，最后结合图像重建算法实现电阻率图像的重建。电阻率图像重建方法首先定义一个满足热声源、电阻率、一次磁矢位空间分量和标量电位空间分量的目标函数，在热声源分布已知的情况下，根据电流连续性定理，求解标量电位的空间分量，然后将标量电位的空间分量和磁矢位空间分量代入目标函数，重建电阻率的分布。

