



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104458818 A

(43) 申请公布日 2015. 03. 25

(21) 申请号 201410773989. X

G01R 27/02(2006. 01)

(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 夏正武 李士强 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.

G01N 27/02(2006. 01)

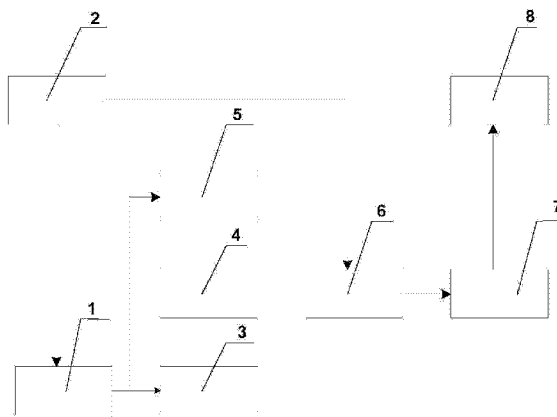
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

一种基于线性泊松方程的磁热声成像电导率重建方法

(57) 摘要

一种基于线性泊松方程的磁热声成像电导率重建方法,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,超声信号处理、采集子系统采集和处理此信号,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导率图像的重建。电导率图像重建方法首先定义一个满足热声源、电导率、一次磁失位空间分量和标量电位空间分量的目标函数,并给定电导率的初值,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,重建电导率的分布。



1. 一种基于线性泊松方程的磁热声成像电导率重建方法,其特征在于:所述的磁热声成像电导率重建方法包括以下步骤:

第一步:获取磁热声信号

由具有线性调频电流激励源(1)产生线性调频电流激励信号经激励线圈作用在导电物体(4)上,导电物体(4)由于感应电流的作用产生焦耳热,进而产生电磁热声信号;利用超声换能器(6)接收产生的电磁热声信号,然后通过超声信号处理、采集子系统(7)对信号进行采集和处理;控制电路实现对电流激励源、超声换能器(6)和超声信号处理、采集子系统(7)的控制和同步;利用超声换能器(6)对产生的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热声信号,将获得电磁热声信号进行存储;

第二步:获取热声源分布

根据电磁热声的产生原理,得出电磁热声成像的声压波动方程:

$$\nabla^2 p(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 p(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = -\frac{\beta}{C_p} S(\mathbf{r}) \delta'(t) \quad (1)$$

其中  $\mathbf{r}$  为超声换能器与热声源之间的距离,  $p(\mathbf{r}, t)$  是声压,  $c_x$  为热声源在介质中的传播声速,  $C_p$  为导电物体的比热容,  $\beta$  为导电物体的热膨胀系数,  $\delta(t)$  是狄拉克函数,  $S(\mathbf{r})$  是热声源分布,  $t$  是时间项;

根据声压波动方程,利用时间反演法得到热函数的重建公式:

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

其中  $R = |\mathbf{r}' - \mathbf{r}|$ ,  $\mathbf{e}_R = \frac{\mathbf{R}}{R}$ ,  $\mathbf{r}'$  是超声换能器的位置,  $S_d$  是超声换能器所在的平面,  $p'$  是声压对时间的一阶导数,  $\mathbf{n}$  是  $\mathbf{r}'$  位置  $S_d$  的法线矢量;

选取导电物体的某一断面  $z = z_0$ , 利用公式(2)获取断面上的热声源  $S(x, y, z_0)$ ; 导电物体上所有热声源分布通过断层数据  $S(x, y, z_0)$  在  $z$  方向的插值得到, 或者通过移动超声换能器通过测量的方式获取;

第三步:获取导电物体标量电位空间分量

导电物体的热声源直接与导电物体的电场强度和电导率相关:

$$S = \sigma E^2 = \sigma \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \quad (3)$$

其中  $\mathbf{E}$  是磁场强度;

因生物组织的电导率较低, 电场强度的空间分量  $\mathbf{E}$  表示为:

$$\mathbf{E} \approx -\nabla\phi - \mathbf{A}_1 \quad (4)$$

其中  $\mathbf{A}_1$  为一次磁矢位的空间分量, 一次磁矢位与导电物体无关, 是电流激励源在真空中产生的磁矢位,  $\phi$  是标量电位的空间分量,  $\nabla$  是哈密顿算符;

根据电流连续性定理, 有:

$$\nabla \cdot \sigma(\nabla\phi + \mathbf{A}_1) = 0 \quad (5)$$

其中,  $\sigma$  为导电物体的电导率, 对导电物体进行空间离散, 给出导电物体电导率的初值  $[\sigma]^0$ , 将  $[\sigma]^0$  和一次磁矢位的空间分量  $\mathbf{A}_1$  代入公式(5), 利用线性有限元方法求解得到标

量电位的空间分量  $[\phi]^1$ ;

第四步:定义目标函数

由公式 (3) 和公式 (4) 得到:

$$\sigma = \frac{S}{\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}} = \frac{S}{(\nabla\phi + \mathbf{A}_1) \cdot (\nabla\phi + \mathbf{A}_1)} \quad (6)$$

定义目标函数:

$$f(\sigma) = [S - \sigma(\nabla\phi + \mathbf{A}_1) \cdot (\nabla\phi + \mathbf{A}_1)]^2 \quad (7)$$

第五步:最优化迭代求解导电物体电导率:

将标量电位的空间分量  $[\phi]^1$  和一次磁矢位的空间分量  $\mathbf{A}_1$  代入目标函数, 通过最优化算法进行迭代, 直到误差满足终止条件, 所得的电导率即为最终导电物体的最终电导率。

## 一种基于线性泊松方程的磁热声成像电导率重建方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种电导率图像的重建方法,特别涉及一种基于线性泊松方程的磁热声成像电导率重建方法。

### 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导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在最近一年受到重视。

[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导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导率分布,目前的相关文献和专利只重建了热声源 ( $S = \sigma E^2(\sigma)$ , 这里  $E$  为电场强度的空间分量),而没有提及电导率  $\sigma$  的重建。显然,电场强度  $E$  与电导率  $\sigma$  的分布有关,从热声源  $S$  中重建出电导率  $\sigma$  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导率分布的不足,提出一种基于线性泊松方程最优化迭代的磁热声成像电导率重建方法,本发明可以精确的重建导电物体的电导率。

[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,进而产生超声信号,利用超声换能器接收超声信号,对接收到的超声信号借助电导率图像重建子系统重建导电物体的电导率图像。

[0006] 本发明磁热声成像电导率的重建方法主要包括五个步骤:第一步获取有效的磁热声信号;第二步利用磁热声信号,采用时间反演法获取热声源分布;第三步对导电物体进行空间离散,给出电导率的初值,根据电流连续性定理和磁热声分布,求解线性泊松方程获取导电物体标量电位的空间分量;第四步设定泊松方程满足的目标函数;第五步将标量电位的空间分量和一次磁失位空间分量代入目标函数,通过最优化算法进行迭代,直到误差

满足终止条件,最终获取导电物体的电导率分布。

[0007] 具体步骤如下:

[0008] 第一步:获取磁热声信号

[0009] 首先由具有线性调频电流激励源产生线性调频电流激励信号,产生的电流激励信号经激励线圈作用在导电物体上,导电物体由于感应电流的作用产生焦耳热,进而产生电磁热声信号。本发明线性调频信号的调制频率范围在 10MHz-30MHz,载波频率范围在 0.5MHz-5MHz 范围可选。利用超声换能器接收产生的电磁热声信号,然后通过超声信号处理、采集子系统对信号进行采集并处理,控制电路实现对电流激励源、超声换能器和超声信号处理、采集子系统的控制和同步,利用超声换能器对产生的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热声信号,将获得电磁热声信号进行存储。

[0010] 第二步:获取热声源分布

[0011] 根据电磁热声的产生原理,得出电磁热声成像的声压波动方程:

$$[0012] \quad \nabla^2 p(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 p(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = -\frac{\beta}{C_p} S(\mathbf{r}) \delta'(t) \quad (1)$$

[0013] 其中  $r$  为超声换能器与热声源之间的距离,  $p(\mathbf{r}, t)$  是声压,  $c_s$  为热声源在介质中的传播声速,  $C_p$  为导电物体的比热容,  $\beta$  为导电物体的热膨胀系数,  $\delta(t)$  是狄拉克函数,  $S(\mathbf{r})$  是热声源分布,  $t$  是时间项;

[0014] 根据声压波动方程,利用时间反演法得到热函数的重建公式:

[0015]

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

[0016] 其中  $R = |\mathbf{r}' - \mathbf{r}|$ ,  $\mathbf{e}_R = \frac{\mathbf{R}}{R}$ ,  $\mathbf{r}'$  是超声换能器的位置,  $S_d$  是超声换能器所在的平面,  $p'$  是声压对时间的一阶导数,  $\mathbf{n}$  是  $\mathbf{r}'$  位置  $S_d$  的法线矢量。

[0017] 选取导电物体的某一断层面  $z = z_0$ , 利用公式 (2) 获取断面上的热声源  $S(x, y, z_0)$ 。导电物体上所有热声源分布通过断层数据  $S(x, y, z_0)$  在  $z$  方向的插值得到,或者通过移动超声换能器通过测量的方式获取;

[0018] 第三步:获取导电物体标量电位空间分量

[0019] 导电物体的热声源直接与导电物体的电场强度和电导率相关:

$$[0020] \quad S = \sigma E^2 = \sigma \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \quad (3)$$

[0021] 其中  $\mathbf{E}$  是磁场强度。

[0022] 本发明磁热声成像电导率重建方法主要用于生物组织的成像,考虑到生物组织的电导率较低,电场强度的空间分量  $\mathbf{E}$  表示为:

$$[0023] \quad \mathbf{E} \approx -\nabla\phi - \mathbf{A}_1 \quad (4)$$

[0024] 其中  $\mathbf{A}_1$  为一次磁矢位的空间分量,一次磁矢位与导电物体无关,是电流激励源在真空中产生的磁矢位,  $\phi$  是标量电位的空间分量,  $\nabla$  是哈密顿算符。

[0025] 根据电流连续性定理,有:

$$[0026] \quad \nabla \cdot \sigma(\nabla\phi + \mathbf{A}_1) = 0 \quad (5)$$

[0027] 其中,  $\sigma$  为导电物体的电导率, 对导电物体进行空间离散, 给出导电物体电导率的初值  $[\sigma]^0$ , 将  $[\sigma]^0$  和一次磁矢位的空间分量  $A_1$  代入公式 (5), 利用线性有限元方法求解得到标量电位的空间分量  $[\phi]^1$ 。

[0028] 第四步: 定义目标函数

[0029] 由公式 (3) 和公式 (4) 得到:

$$[\text{0030}] \quad \sigma = \frac{S}{\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}} = \frac{S}{(\nabla\phi + \mathbf{A}_1) \cdot (\nabla\phi + \mathbf{A}_1)} \quad (6)$$

[0031] 定义目标函数:

$$[\text{0032}] \quad f(\sigma) = [S - \sigma(\nabla\phi + \mathbf{A}_1) \cdot (\nabla\phi + \mathbf{A}_1)]^2 \quad (7)$$

[0033] 第五步: 最优化迭代求解导电物体电导率:

[0034] 将标量电位的空间分量  $[\phi]^1$  和一次磁矢位的空间分量  $A_1$  代入目标函数, 通过最优化算法进行迭代, 直到误差满足终止条件, 所得的电导率即为最终导电物体的最终电导率。

## 附图说明

[0035] 图 1 本发明重建方法所涉及的磁热声信号获取过程示意图;

[0036] 图中: 1 电流激励源, 2 控制电路, 3 第一激励线圈, 4 导电物体, 5 第二激励线圈, 6 超声换能器, 7 超声信号处理、采集子系统, 8 图像重建子系统。

## 具体实施方式

[0037] 以下结合附图和具体实施方式进一步说明本发明。

[0038] 本发明磁热声成像电导率重建方法主要包括五个步骤: 第一步获取有效的磁热声信号; 第二步利用磁热声信号, 采用时间反演法获取热声源分布; 第三步对导电物体进行空间离散, 给出电导率的初值, 根据电流连续性定理和磁热声分布, 求解线性泊松方程获取导电物体标量电位的空间分量; 第四步设定泊松方程满足的目标函数; 第五步将标量电位的空间分量和一次磁失位空间分量代入目标函数, 通过最优化算法进行迭代, 直到误差满足终止条件, 最终获取导电物体的电导率分布。

[0039] 具体步骤如下:

[0040] 第一步: 获取磁热声信号

[0041] 如图 1 所示, 由具有线性调频电流激励源 1 产生线性调频电流激励信号经激励线圈作用在导电物体 4 上, 导电物体 4 由于感应电流的作用产生焦耳热, 进而产生电磁热声信号; 利用超声换能器 6 接收产生的电磁热声信号, 然后通过超声信号处理、采集子系统 7 对信号进行采集、处理; 控制电路实现对电流激励源、超声换能器 6 和超声信号处理、采集子系统 7 的控制和同步, 利用超声换能器 6 对产生的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热声信号, 将获得电磁热声信号进行存储; 从第二步开始, 图像重建子系统 8 将获得的磁热声信号重建得到电导率图像。

[0042] 第二步: 获取热声源分布

[0043] 根据电磁热声的产生原理, 得出电磁热声成像的声压波动方程:

$$[0044] \quad \nabla^2 p(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} p(\mathbf{r}, t) = -\frac{\beta}{C_p} S(\mathbf{r}) \delta'(t) \quad (1)$$

[0045] 其中  $r$  为超声换能器与热声源之间的距离,  $p(\mathbf{r}, t)$  是声压,  $c_s$  为热声源在介质中的传播声速,  $C_p$  为目标体的比热容,  $\beta$  为目标体的热膨胀系数,  $\delta(t)$  是狄拉克函数,  $S(\mathbf{r})$  是热声源分布,  $t$  是时间项;

[0046] 根据声压波动方程, 利用时间反演法得到热函数的重建公式:

[0047]

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

[0048] 其中  $R = |\mathbf{r}' - \mathbf{r}|$ ,  $\mathbf{e}_R = \frac{\mathbf{R}}{R}$ ,  $\mathbf{r}'$  是超声换能器的位置,  $S_d$  是超声换能器所在的平面,  $p'$  是声压对时间的一阶导数,  $\mathbf{n}$  是  $\mathbf{r}'$  位置  $S_d$  的法线矢量。

[0049] 选取导电物体的某一断层面  $z = z_0$ , 利用公式 (2) 获取断面上的热声源  $S(x, y, z_0)$ , 导电物体上所有热声源分布通过断层数据  $S(x, y, z_0)$  在  $z$  方向的插值得到, 或者通过移动超声换能器通过测量的方式获取。

[0050] 第三步: 获取导电物体标量电位空间分量

[0051] 导电物体的热声源直接与导电物体的电场强度和电导率相关:

$$[0052] \quad S = \sigma E^2 = \sigma \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \quad (3)$$

[0053] 其中  $E$  是磁场强度。

[0054] 本发明所述的磁热声成像方法主要用于生物组织的成像, 考虑到生物组织的电导率较低, 电场强度的空间分量表示为:

$$[0055] \quad \mathbf{E} \approx -\nabla\phi - \mathbf{A}_1 \quad (4)$$

[0056] 其中  $\mathbf{A}_1$  为一次磁矢位的空间分量, 一次磁矢位与导电物体无关, 是电流激励源在真空中产生的磁矢位,  $\phi$  是标量电位的空间分量,  $\nabla$  是哈密顿算符;

[0057] 根据电流连续性定理, 有:

$$[0058] \quad \nabla \cdot \sigma(\nabla\phi + \mathbf{A}_1) = 0 \quad (5)$$

[0059] 对导电物体进行空间离散, 给出电导率的初值  $[\sigma]^0$ , 将  $[\sigma]^0$  和一次磁矢位的空间分量  $\mathbf{A}_1$  代入公式 (5), 利用线性有限元方法求解得到标量电位的空间分量  $[\phi]^1$ ;

[0060] 第四步: 定义目标函数

[0061] 由公式 (3) 和公式 (4) 得到:

$$[0062] \quad \sigma = \frac{S}{\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}} = \frac{S}{(\nabla\phi + \mathbf{A}_1) \cdot (\nabla\phi + \mathbf{A}_1)} \quad (6)$$

[0063] 定义目标函数:

$$[0064] \quad f(\sigma) = [S - \sigma(\nabla\phi + \mathbf{A}_1) \cdot (\nabla\phi + \mathbf{A}_1)]^2 \quad (7)$$

[0065] 第五步: 最优化迭代求解导电物体电导率:

[0066] 将标量电位的空间分量  $[\phi]^1$  和一次磁矢位的空间分量  $\mathbf{A}_1$  代入目标函数, 通过最优化算法进行迭代, 直到误差满足终止条件, 所得的电导率即为最终导电物体的最终电导

率。



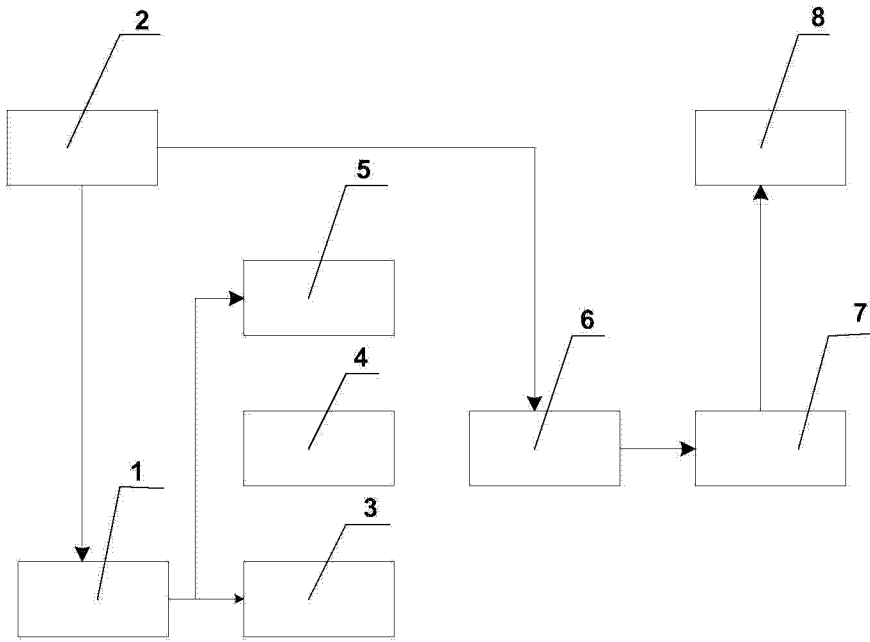


图 1