



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106885842 B

(45)授权公告日 2019.10.15

(21)申请号 201710089730.7

G01N 27/02(2006.01)

(22)申请日 2017.02.20

A61B 5/053(2006.01)

A61B 8/08(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 106885842 A

(43)申请公布日 2017.06.23

(73)专利权人 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 李艳红 刘国强 夏正武 杨延菊
夏慧 李士强

(74)专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责
任公司 11251

代理人 关玲

(51)Int.Cl.

G01N 29/00(2006.01)

(56)对比文件

CN 104473639 A,2015.04.01,

WO 2010006349 A3,2010.05.20,

黄欣等.注入电流式磁声成像的实验研究.

《现代科学仪器》.2013,

Daniel Razansky等.Near-field

radiofrequency thermoacoustic tomography

with impulse excitation.《Med.Phys》.2010,

审查员 任晓峰

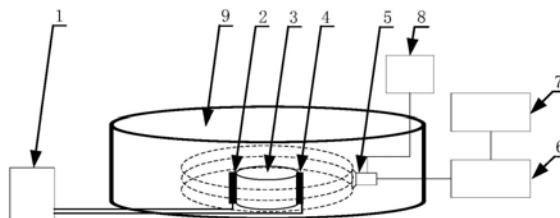
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54)发明名称

一种注入电流式热声成像电阻率重建方法

(57)摘要

一种注入电流式热声成像电阻率重建方法,基于电流注入方式的热声成像原理。通过电极向成像目标体注入脉冲电流,在成像目标体中产生焦耳热,引起热膨胀,产生超声信号,用超声换能器接收超声信号,对接收到的超声信号进行处理和采集,采用电阻率图像重建算法获取目标体的电阻率图像。具体步骤为:1、首先获取注入电流式热声信号;2、利用获取的注入电流式热声信号重建目标体热声源;3、利用热声源,采用非线性有限元求解方法重建矢量电位;4、利用重建的矢量电位重建电阻率。



1. 一种注入电流式热声成像电阻率重建方法,其特征在于,所述的注入电流式热声电阻率图像重建方法基于注入电流式的热声成像原理,通过电极向成像目标体注入脉冲电流,在成像目标体中产生焦耳热,引起热膨胀,产生超声信号,用超声换能器接收超声信号,对接收到的超声信号进行处理和采集,采用电阻率图像重建算法获取目标体的电阻率图像;

热声源的获取方法为:已知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} 为超声换能器位置, $p(\mathbf{r},t)$ 是声压, c_s 为介质中的声速, C_p 为目标体(3)的比热容, β 为目标体(3)的热膨胀系数, $\delta(t)$ 是狄拉克函数, $S(\mathbf{r})$ 为热声源分布, t 为时间, ∇^2 为拉普拉斯算符;

选取目标体的某一断层面 $z=z_1$,超声换能器在此断层面上进行圆周扫描,采集超声信号,利用方程(1),求解 $z=z_1$ 断面上的热声源分布 $S(x,y,z_1)$,移动超声换能器在不同断层面上进行扫描检测,求解不同断面上的热声源分布,目标体(3)上整体热声源 S 可由分层检测计算或 z 方向上插值得到;

热声源 S 同时是电阻率和电流密度的函数表示为:

$$S = \rho J^2 = \rho \mathbf{J} \cdot \mathbf{J} \quad (3)$$

其中, ρ 为目标体(3)的电阻率, \mathbf{J} 为目标体(3)内电流密度分布;

所述的注入电流式热声成像电阻率重建方法包括以下步骤:

第一步:获取注入电流式热声信号

激励源(1)通过注入电极A(2)和注入电极B(4)对目标体(3)注入脉冲电流,目标体(3)在电流作用下产生焦耳热,进而产生热膨胀,激发超声信号,超声信号通过耦合剂耦合到超声换能器(5),超声换能器(5)接收到信号后通过检测系统(6)进行信号的放大、滤波、采集和存储,在上位机(7)中实现图像重建,超声换能器(5)在控制器(8)控制下对目标体进行扫描检测;

第二步:获取目标体热声源

根据第一步采用一对注入电极A(2)、注入电极B(4),向目标体注入电流后,引发热膨胀,激发声信号,检测到声压信号,采用声压信号重建目标体上整体热声源;

第三步:求解矢量电位

根据电流连续性定理,电流的散度为零, $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$,引入矢量电位,则有:

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T} \quad (4)$$

其中, \mathbf{T} 为矢量电位, $\nabla \times \mathbf{T}$ 为矢量电位的旋度, ∇ 为哈密顿算符;

利用欧姆定律, $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = \mathbf{E} / \rho$,则有:

$$\nabla \times (\rho \nabla \times \mathbf{T}) = 0 \quad (5)$$

由式(3)和式(4)可得:

$$\rho = \frac{S}{\nabla \times \mathbf{T} \cdot \nabla \times \mathbf{T}} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)中,得到:

$$\nabla \times \left(\frac{S}{\nabla \times \mathbf{T} \cdot \nabla \times \mathbf{T}} \nabla \times \mathbf{T} \right) = 0 \quad (7)$$

满足的边界条件为:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{T} \cdot \mathbf{n}|_{\Gamma_{A,B}} = \pm \frac{I}{A_0} \\ \nabla \times \mathbf{T} \cdot \mathbf{n}|_{\Gamma_g} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\Gamma_{A,B}$ 为注入电极位置, Γ_g 为除去电极之外的目标体边界, A_0 为电极与目标体接触面积, I 为注入电流, \mathbf{n} 表示区域的外法向单位矢量;

将热声源 S 代入公式(7),结合边界条件(8),进行有限元法求解,即可重建得到矢量电位 T ;

第四步:求解电阻率

将矢量电位 T 代入公式(6),即可重建电阻率 ρ 。

一种注入电流式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图像重建方法,特别涉及一种注入电流式电阻率图像重建方法。

背景技术

[0002] 由于激励频率的限制,传统电阻抗成像技术的灵敏度和空间分辨率不高。单一场都有其物理局限性,多物理场成像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,成为人们研究的热点,磁热声成像正是一种新兴的多物理场成像技术。

[0003] 磁热声成像是由新加坡南洋理工大学的Feng在2013年首次提出的新型的电阻抗成像方法,其原理为:通过对导电成像体施加MHz量级的交变磁场,在目标体内部产生感应电场,进而产生焦耳热,激发热弹性的超声信号,检测超声信号进行成像。与微波热声成像相比,允许更低的功率进行高效的成像,并且具有便携式成像的潜力,同时,激励源的频率降低,使得磁场穿透组织更深,也避免的辐射。

[0004] 作为一种新型的多物理场成像方法,2013年Feng利用金属铜仿体,检测到磁热声信号,并得到铜仿体的热声图像,并未进行电阻率图像重建,且生物组织不同于金属铜仿体,磁场和感应电流作用产生的洛伦兹力较弱。专利“一种磁热声成像的电阻率重建方法”(201410771496.2)公布了一种基于磁热声效应的电阻率重建方法,其在热函数基础上提出了电阻率重建方法,依然为采用线圈激励方式。同时,外加激励线圈产生时变磁场在目标体中产生二次磁场和感应电流,磁场和感应电流作用同时产生洛伦兹力和焦耳热,即磁声效应和磁热声效应共存,如何区分磁声效应和磁热声效应是仍需解决的问题。

[0005] 基于此,采用注入电流式热声成像方法,可以避免磁声效应和磁热声效应共存问题,注入电流式热声成像与磁热声成像在激励方式、从热函数到电阻率的重建方法上均不相同。

发明内容

[0006] 本发明的目的是克服现有磁热声成像存在的缺点,提出一种基于注入电流式热声成像的电阻率重建方法。本发明利用热声源重建电阻率,避免了热声成像过程中磁声效应的干扰,同时采用注入电流式激励,可增强热声效应,可实现目标体电阻率图像的精确重建。

[0007] 注入电流式热声成像原理为:通过注入电极向成像目标体注入电流,在成像目标体中产生焦耳热,引起热膨胀,产生超声信号,采用超声换能器检测超声信号,根据检测的超声信号重建热声源和电阻率。

[0008] 本发明注入电流式热声成像的电阻率图像重建包括四个步骤:1、首先获取注入电流式热声信号,即检测超声信号;2、利用获取的注入电流式热声信号重建目标体热声源;3、

利用热声源,采用非线性有限元求解方法重建矢量电位;4、利用重建的矢量电位重建电阻率。

[0009] 电阻率图像重建过程具体描述如下:

[0010] 第一步:获取注入电流式热声信号

[0011] 激励源通过注入电极A和注入电极B对目标体注入脉冲电流,目标体在电流作用下产生焦耳热,进而产生热膨胀,激发超声信号,超声信号通过耦合剂耦合到超声换能器,超声换能器接收到信号后通过检测系统进行信号的放大、滤波、采集和存储,超声换能器在控制器控制下对目标体进行扫描检测;

[0012] 第二步:获取目标体热声源

[0013] 已知热声成像的声压波动方程:

$$[0014] \quad \nabla^2 p(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 p(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = -\frac{\beta}{C_p} S(\mathbf{r}) \delta'(t) \quad (1)$$

[0015] 其中 \mathbf{r} 为超声换能器位置, $p(\mathbf{r}, t)$ 是声压, c_s 为介质中的声速, C_p 为目标体(3)的比热容, β 为目标体(3)的热膨胀系数, $\delta(t)$ 是狄拉克函数, $S(\mathbf{r})$ 为热声源分布, t 为时间, ∇^2 为拉普拉斯算符;

[0016] 热声源分布的时间反演法重建公式为:

$$[0017] \quad S(\mathbf{r}) \approx \frac{1}{2\pi c_s^3} \frac{C_p}{\beta} \oint_{\Sigma} dS_d \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_R}{R} p'(\mathbf{r}, |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|/c_s) \quad (2)$$

[0018] 其中, R 为标量, $R = |\mathbf{r}' - \mathbf{r}|$, \mathbf{R} 为矢量, $\mathbf{e}_R = \frac{\mathbf{R}}{R}$, \mathbf{e}_R 为单位矢量, \mathbf{r}' 是超声探头的位置, \mathbf{r} 为热声源位置, S_d 是超声探头所在的平面, 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, β 为目标体的热膨胀系数;

[0019] 选取目标体的某一断层面 $z = z_1$,超声换能器在此断层面上进行圆周扫描,采集超声信号,利用方程(1)和公式(2)求解 $z = z_1$ 断面上的热声源分布 $S(x, y, z_1)$,移动超声换能器在不同断层面上进行扫描检测,求解不同断面上的热声源分布,目标体(3)上整体热声源 S 可由分层检测计算或 z 方向上插值得到;

[0020] 热声源 S 同时是电阻率和电流密度的函数,可以表示为:

$$[0021] \quad S = \rho J^2 = \rho \mathbf{J} \cdot \mathbf{J} \quad (3)$$

[0022] 其中, ρ 为目标体的电阻率, \mathbf{J} 为目标体内电流密度分布;

[0023] 第三步:求解矢量电位

[0024] 根据电流连续性定理,电流的散度为零, $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$,引入矢量电位,则有:

$$[0025] \quad \mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T} \quad (4)$$

[0026] 其中, \mathbf{T} 为矢量电位, $\nabla \times \mathbf{T}$ 为矢量电位的旋度, ∇ 为哈密顿算符;

[0027] 利用欧姆定律, $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = \mathbf{E} / \rho$,则有:

$$[0028] \quad \nabla \times (\rho \nabla \times \mathbf{T}) = 0 \quad (5)$$

[0029] 其中, ρ 为目标体的电阻率, $\nabla \times \mathbf{T}$ 为矢量电位的旋度。

[0030] 由式(3)和式(4)可得:

$$[0031] \quad \rho = \frac{S}{\nabla \times \mathbf{T} \cdot \nabla \times \mathbf{T}} \quad (6)$$

[0032] 将式(6)代入式(5)中,得到:

$$[0033] \quad \nabla \times \left(\frac{S}{\nabla \times \mathbf{T} \cdot \nabla \times \mathbf{T}} \nabla \times \mathbf{T} \right) = 0 \quad (7)$$

[0034] 满足的边界条件为:

$$[0035] \quad \begin{cases} \nabla \times \mathbf{T} \cdot \mathbf{n}|_{\Gamma_{A,B}} = \pm \frac{I}{A_0} \\ \nabla \times \mathbf{T} \cdot \mathbf{n}|_{\Gamma_g} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

[0036] 其中, $\Gamma_{A,B}$ 为注入电极位置, Γ_g 为除去电极之外的目标体边界, A_0 为电极与目标体接触面积, I 为注入电流, \mathbf{n} 表示区域的外法向单位矢量;

[0037] 将热声源 S 代入公式(7),结合边界条件(8),进行有限元法求解,即可重建得到矢量电位 T ;

[0038] 第四步:求解电阻率

[0039] 将矢量电位 T 代入公式(6),即可重建电阻率 ρ 。

附图说明

[0040] 图1本发明重建方法所涉及的注入电流式热声信号获取装置示意图;

[0041] 图中:1激励源、2注入电极A、3目标体、4注入电极B、5超声换能器、6检测系统、7上位机、8控制器、9水槽。

具体实施方式

[0042] 以下结合附图和具体实施方式对本发明做进一步说明。

[0043] 激励源1连接注入电极A2和注入电极B4,向目标体3中注入电流信号。超声换能器5与目标体3之间通过耦合剂耦合,超声换能器5的输出端连接检测系统6的输入端,检测系统6的输出端连接上位机7,在上位机7中实现图像重建。控制器8实现对超声换能器5的旋转扫描运动控制。目标体3、注入电极A2、注入电极B4和超声换能器5置于水槽9中。

[0044] 注入电流式热声成像原理为:通过注入电极向成像目标体注入电流,在成像目标体中产生焦耳热,引起热膨胀,产生超声信号,采用超声换能器进行检测,根据检测的超声信号,重建热声源和电阻率。

[0045] 本发明注入电流式热声成像的电阻率图像重建包括四个步骤:1、首先获取注入电流式热声信号,即检测超声信号;2、利用获取的注入电流式热声信号重建目标体热声源;3、利用热声源,采用非线性有限元求解方法重建矢量电位;4、利用重建的矢量电位重建电阻率。

[0046] 图像重建过程具体描述如下:

[0047] 第一步:获取注入电流式热声信号

[0048] 激励源1通过注入电极A2和注入电极B4对目标体3注入脉冲电流,目标体3在电流作用下产生焦耳热,进而产生热膨胀,激发超声信号,信号通过耦合剂耦合到超声换能器5,超声换能器5接收到信号后通过检测系统6进行信号的放大、滤波、采集和存储,超声换能器

5在控制器8的控制下对目标体进行扫描检测；

[0049] 第二步：获取目标体热声源

[0050] 已知热声成像的声压波动方程：

$$[0051] \quad \nabla^2 p(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 p(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = -\frac{\beta}{C_p} S(\mathbf{r}) \delta'(t) \quad (1)$$

[0052] 其中 \mathbf{r} 为超声换能器位置， $p(\mathbf{r}, t)$ 是声压， c_s 为介质中的声速， C_p 为目标体(3)的比热容， β 为目标体(3)的热膨胀系数， $\delta(t)$ 是狄拉克函数， $S(\mathbf{r})$ 为热声源分布， t 为时间， ∇^2 为拉普拉斯算符；

[0053] 热声源分布的时间反演法重建公式为：

$$[0054] \quad S(\mathbf{r}) \approx \frac{1}{2\pi c_s^3} \frac{C_p}{\beta} \oint_{S_d} dS_d \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_R}{R} p'(\mathbf{r}, |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|/c_s) \quad (2)$$

[0055] 其中， R 为标量， $R = |\mathbf{r}' - \mathbf{r}|$ ， \mathbf{R} 为矢量， $\mathbf{e}_R = \frac{\mathbf{R}}{R}$ ， \mathbf{e}_R 为单位矢量， \mathbf{r}' 是超声探头的位置， \mathbf{r} 为热声源位置， S_d 是超声探头所在的平面， 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， β 为目标体的热膨胀系数；

[0056] 选取目标体的某一断层面 $z = z_1$ ，超声换能器在此断层面上进行圆周扫描，采集超声信号，利用方程(1)、(2)，求解 $z = z_1$ 断层面上的热声源分布 $S(x, y, z_1)$ ，移动超声换能器在不同断层面上进行扫描检测，求解不同断层面上的热声源分布，目标体3上整体热声源 S 可由分层检测计算或 z 方向上插值得到；

[0057] 热声源 S 同时是电阻率和电流密度的函数，可以表示为：

[0058] $S = \rho J^2 = \rho \mathbf{J} \cdot \mathbf{J}$ (3)

[0059] 其中， ρ 为目标体3的电阻率， \mathbf{J} 为目标体3内电流密度分布；

[0060] 第三步：求解矢量电位

[0061] 根据电流连续性定理，电流的散度为零， $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ ，引入矢量电位，则有：

[0062] $\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T}$ (4)

[0063] 其中， \mathbf{T} 为矢量电位， $\nabla \times \mathbf{T}$ 为矢量电位的旋度， ∇ 为哈密顿算符；

[0064] 利用欧姆定律， $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = \mathbf{E} / \rho$ ，则有：

[0065] $\nabla \times (\rho \nabla \times \mathbf{T}) = 0$ (5)

[0066] 其中， ρ 为目标体的电阻率， $\nabla \times \mathbf{T}$ 为矢量电位的旋度。

[0067] 由式(3)和式(4)可得：

[0068] $\rho = \frac{S}{\nabla \times \mathbf{T} \cdot \nabla \times \mathbf{T}}$ (6)

[0069] 将式(6)代入式(5)中，得到：

[0070] $\nabla \times \left(\frac{S}{\nabla \times \mathbf{T} \cdot \nabla \times \mathbf{T}} \nabla \times \mathbf{T} \right) = 0$ (7)

[0071] 满足的边界条件为：

$$[0072] \quad \begin{cases} \nabla \times \mathbf{T} \cdot \mathbf{n}|_{\Gamma_{A,B}} = \pm \frac{I}{A_0} \\ \nabla \times \mathbf{T} \cdot \mathbf{n}|_{\Gamma_g} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

[0073] 其中, $\Gamma_{A,B}$ 为注入电极位置, Γ_g 为除去电极之外的目标体边界, A_0 为电极与目标体接触面积, I 为注入电流, \mathbf{n} 表示区域的外法向单位矢量;

[0074] 将热声源 S 代入公式(7), 结合边界条件(8), 进行有限元法求解, 即可重建得到矢量电位 T ;

[0075] 第四步: 求解电阻率

[0076] 将矢量电位 T 代入公式(6), 即可重建电阻率 ρ 。

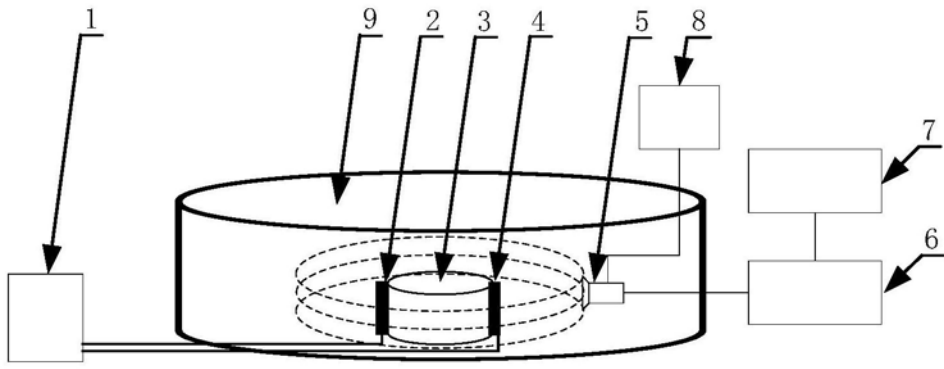


图1

专利名称(译)	一种注入电流式热声成像电阻率重建方法		
公开(公告)号	CN106885842B	公开(公告)日	2019-10-15
申请号	CN2017110089730.7	申请日	2017-02-20
[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	李艳红 刘国强 夏正武 杨延菊 夏慧 李士强		
发明人	李艳红 刘国强 夏正武 杨延菊 夏慧 李士强		
IPC分类号	G01N29/00 G01N27/02 A61B5/053 A61B8/08		
代理人(译)	关玲		
审查员(译)	任晓峰		
其他公开文献	CN106885842A		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

一种注入电流式热声成像电阻率重建方法，基于电流注入方式的热声成像原理。通过电极向成像目标体注入脉冲电流，在成像目标体中产生焦耳热，引起热膨胀，产生超声信号，用超声换能器接收超声信号，对接收到的超声信号进行处理和采集，采用电阻率图像重建算法获取目标体的电阻率图像。具体步骤为：1、首先获取注入电流式热声信号；2、利用获取的注入电流式热声信号重建目标体热声源；3、利用热声源，采用非线性有限元求解方法重建矢量电位；4、利用重建的矢量电位重建电阻率。

