



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108460225 A

(43)申请公布日 2018.08.28

(21)申请号 201810232394.1

(22)申请日 2018.03.21

(71)申请人 华北电力大学(保定)

地址 071000 河北省保定市永华北大街619号

(72)发明人 孙正 刘思佳

(74)专利代理机构 北京高沃律师事务所 11569

代理人 王戈

(51)Int.Cl.

G06F 17/50(2006.01)

权利要求书4页 说明书13页 附图3页

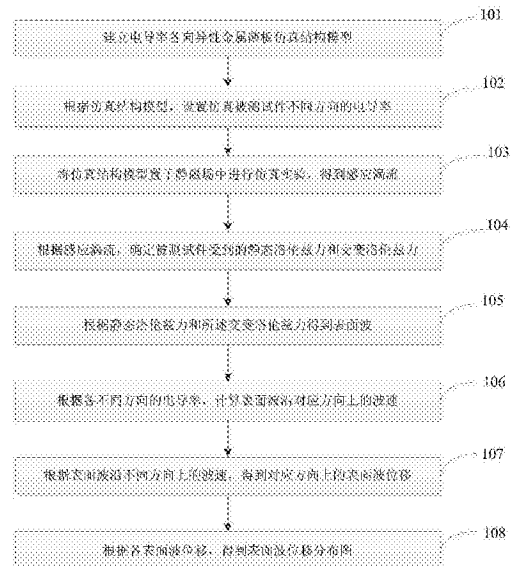
(54)发明名称

一种各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真方法及系统

(57)摘要

本发明公开一种各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真方法及系统。方法包括:建立电导率各向异性金属薄板仿真结构模型;根据模型设置仿真被测试件不同方向的电导率;将模型置于静磁场中进行仿真实验,得到感应涡流;根据感应涡流,确定被测试件受到的静态洛伦兹力和交变洛伦兹力;根据静态洛伦兹力和所述交变洛伦兹力得到表面波;根据各不同方向的电导率,计算表面波沿对应方向上的波速;根据表面波沿不同方向上的波速,得到对应方向上的表面波位移;根据各表面波位移,得到表面波位移分布图。采用本发明的方法或系统能够通过改变各个方向上的电导率,精确地仿真电导率分布各向异性金属薄板表面的力分布和表面波位移。

CN 108460225 A



1. 一种各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真方法,其特征在于,所述仿真方法包括:

建立电导率各向异性金属薄板仿真结构模型,所述仿真结构模型中包括仿真被测试件和仿真折线线圈;

根据所述仿真结构模型,设置所述仿真被测试件不同方向的电导率;

将所述仿真结构模型置于静磁场中进行仿真实验,得到感应涡流;

根据所述感应涡流,确定所述被测试件受到的静态洛伦兹力和交变洛伦兹力;

根据所述静态洛伦兹力和所述交变洛伦兹力得到表面波;

根据各不同方向的电导率,计算所述表面波沿对应方向上的波速;

根据表面波沿不同方向上的波速,得到对应方向上的表面波位移;

根据各所述表面波位移,得到表面波位移分布图。

2. 根据权利要求1所述的各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真方法,所述根据所述仿真结构模型,设置所述被测试件不同方向的电导率,具体包括:

基于所述被测试件建立三维笛卡尔直角坐标系,其中,以所述被测试件的表面中心为原点,与所述被测试件水平面平行的为X轴,与X轴垂直的为Y轴,与所述XOY面垂直的为Z轴;

设置被测试件在X轴、Y轴和Z轴三个方向上的电导率。

3. 根据权利要求1所述的各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真方法,所述将所述仿真结构模型置于静磁场中,计算所述被测试件受到的静态洛伦兹力和交变洛伦兹力,具体包括:

根据 $F_s(\mathbf{h}, t) = -\sqrt{j\sigma\omega\mu_0}IB_s \int_0^\infty e^{-kz_0} J_0(k)J_0(kr)kdk$, 得到被测试件受到的静态洛伦兹力 $F_s(\mathbf{h}, t)$;

其中, $F_s(\mathbf{h}, t)$ 为被测试件受到的静态洛伦兹力, σ 为电导率, μ_0 为空间磁导率, j 是虚部单位, B_s 为静磁场强度, z_0 为折线线圈与被测试件的垂直距离, k 为径向积分变量, I 为激励电流的幅值, ω 为激励电流的角频率, $J_0(k)$ 为自变量为 k 的第一类零阶Bessel函数, $J_0(kr)$ 为自变量为 kr 的第一类零阶Bessel函数。

根据 $F_d(\mathbf{h}, t) = -\mu_0 I^2 \int_0^\infty e^{-kz_0} J_0(k)J_0(kr)kdk \int_0^\infty e^{-kz_0} J_0(k)J_0(kr)k^2 dk$, 得到被测试件受到的交变洛伦兹力 $F_d(\mathbf{h}, t)$;

其中, $F_d(\mathbf{h}, t)$ 为被测试件受到的交变洛伦兹力, μ_0 为空间磁导率, I 为激励电流的幅值, k 为径向积分变量, z_0 为折线线圈与被测试件的垂直距离, j 是虚部单位, $J_0(k)$ 为自变量为 k 的第一类零阶Bessel函数, $J_0(kr)$ 为自变量为 kr 的第一类零阶Bessel函数。

4. 根据权利要求2所述的各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真方法,所述根据所述电导率计算所述表面波沿不同方向的波速,具体包括:

表面波的传播仅位于YOZ平面,与X轴无关;

根据 $v_{RY} = \frac{0.87 + 1.12\sigma_y}{1 + \sigma_y} \sqrt{\frac{\mu_m}{\rho_m}}$, 得到所述表面波沿Y轴传播的波速 v_{RY} ;

其中, v_{RY} 为所述表面波沿Y轴传播的波速, σ_y 为Y轴方向的电导率, μ_m 为所述被测试件的Lame常数, ρ_m 为所述被测试件的密度;

根据 $v_{RZ} = \frac{0.87 + 1.12\sigma_z}{1 + \sigma_z} \sqrt{\frac{\mu_m}{\rho_m}}$, 得到所述表面波沿Z轴传播的波速 v_{RZ} ;

其中, v_{RZ} 为所述表面波沿Z轴传播的波速, σ_z 为Z轴方向的电导率, μ_m 为所述被测试件的Lame常数, ρ_m 为所述被测试件的密度。

5. 根据权利要求4所述的各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真方法, 所述根据所述波速得到所述表面波位移, 具体包括:

根据 $K_{RY} = \frac{\omega_{RY}}{v_{RY}}$ 计算所述表面波沿Y轴方向传播的面内波数 K_{RY} ;

其中, K_{RY} 为所述表面波沿Y轴方向传播的面内波数, ω_{RY} 为所述表面波沿Y轴正方向的振动角频率, v_{RY} 为所述表面波沿Y轴传播的波速;

根据 $u(y, t) = -\frac{K_T K_{RY}}{2\mu_m \pi} \left(e^{-\alpha z} - \frac{2\alpha\beta}{K_{RY}^2 + \beta^2} e^{-\beta z} \right) e^{j(K_{RY}y - \omega_{RY}t)}$, 计算t时刻所述表面波沿Y轴的面内位移 $u(y, t)$;

其中, $u(y, t)$ 为被测试件中点h处的表面波在时刻t沿Y轴的面内位移, ω_{RY} 为表面波沿Y轴正方向的振动角频率, α 和 β 是表面波沿Z轴正方向的衰减系数, K_T 为横波波数, K_{RY} 为所述表面波沿Y轴正方向的波数, μ_m 为所述被测试件的Lame常数;

根据 $K_{RZ} = \frac{\omega_{RZ}}{v_{RZ}}$ 计算所述表面波沿Z轴方向传播的面外波数 K_{RZ} ;

其中, K_{RZ} 为所述表面波沿Z轴方向传播的面外波数, ω_{RZ} 为所述表面波沿Z轴正方向的振动角频率, v_{RZ} 为所述表面波沿Z轴传播的波速;

根据 $u(z, t) = -\frac{jK_T}{2\mu_m \pi} \alpha \left(e^{-\alpha z} - \frac{2K_{RY}^2}{K_{RY}^2 + \beta^2} e^{-\beta z} \right) e^{j(K_{RZ}z - \omega_{RZ}t)}$ 计算t时刻所述表面波沿Z轴的面外位移 $u(z, t)$;

其中, $u(z, t)$ 为被测试件中点h处的表面波在时刻t沿Z轴的面外位移, ω_{RZ} 为表面波沿Z轴正方向的振动角频率, α 和 β 为表面波沿Z轴正方向的衰减系数, K_T 为横波波数, K_{RZ} 是所述表面波沿Y轴正方向的波数, μ_m 为所述被测试件的Lame常数。

6. 根据权利要求4所述的各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真方法, 所述表面波位移分布图包括表面波面内位移分布图和表面波面外位移分布图;

所述根据所述表面波位移得到表面波位移分布图, 具体包括:

所述根据所述表面波位移得到表面波位移分布图, 具体包括:

根据公式 $G_y(m, n) = 255 \cdot \frac{u(y, t) - \min\{u(y, t) | y = 0, 1, \dots, W; t = 0, 1, \dots, T\}}{\max\{u(y, t) | y = 0, 1, \dots, W; t = 0, 1, \dots, T\} - \min\{u(y, t) | y = 0, 1, \dots, W; t = 0, 1, \dots, T\}}$

计算所述表面波面内位移灰度图中像素 (m, n) 处的灰度值 $G_y(m, n)$;

根据各所述灰度值 $G_y(m, n)$ 得到表面波面内位移分布图 G_y ;

其中, $G_y(m, n)$ 为所述表面波面内位移灰度图 G_y 中像素 (m, n) 处的灰度值; $\min\{u(y, t) | y = 0, 1, \dots, W; t = 0, 1, \dots, T\}$ 为所述表面波面内位移的最小值, $\max\{u(y, t) | y = 0, 1, \dots, W; t = 0, 1, \dots, T\}$ 为所述表面波面内位移的最大值, $u(y, t)$ 为被测试件中点h处的表面波在时刻t沿Y轴的面内位移;

根据公式 $G_z(m,n) = 255 \cdot \frac{u(z,t) - \min\{u(z,t) | z=0,1,\dots,H; t=0,1,\dots,T\}}{\max\{u(z,t) | z=0,1,\dots,H; t=0,1,\dots,T\} - \min\{u(z,t) | z=0,1,\dots,H; t=0,1,\dots,T\}}$

计算所述表面波面外位移灰度图中像素 (m,n) 处的第二灰度值 $G_z(m,n)$;

根据各所述第二灰度值 $G_z(m,n)$ 得到表面波面外位移分布图 G_z ;

其中, $G_z(m,n)$ 为所述表面波面外位移灰度图 G_z 中像素 (m,n) 处的灰度值; $\min\{u(z,t) | z=0,1,\dots,H; t=0,1,\dots,T\}$ 为所述表面波面外位移的最小值, $\max\{u(z,t) | z=0,1,\dots,H; t=0,1,\dots,T\}$ 为所述表面波面外位移的最大值, $u(z,t)$ 为被测试件中点 h 处的表面波在时刻 t 沿 Z 轴的面外位移。

7. 一种各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真系统, 其特征在于, 所述仿真系统包括:

仿真结构模型建立模块, 用于建立电导率各向异性金属薄板仿真结构模型, 所述仿真结构模型中包括仿真被测试件和仿真折线圈;

电导率设置模块, 用于根据所述仿真结构模型, 设置所述被测试件不同方向的电导率;

感应涡流获取模块, 用于将所述仿真结构模型置于静磁场中进行仿真实验, 得到感应涡流;

洛伦兹力确定模块, 用于根据所述感应涡流, 确定所述被测试件受到的静态洛伦兹力和交变洛伦兹力;

表面波获取模块, 用于根据所述静态洛伦兹力和所述交变洛伦兹力得到表面波;

波速计算模块, 用于根据各不同方向的电导率, 计算所述表面波沿对应方向上的波速;

表面波位移获取模块, 用于根据表面波沿不同方向上的波速, 得到对应方向上的表面波位移;

分布图获取模块, 用于根据各所述表面波位移, 得到表面波位移分布图。

8. 根据权利要求7所述的各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真系统, 所述电导率设置模块, 具体包括:

直角坐标系单元, 用于基于所述被测试件建立三维笛卡尔直角坐标系, 其中, 以所述被测试件的表面中心为原点, 与所述被测试件水平面平行的为 X 轴, 与 X 轴垂直的为 Y 轴, 与所述 XOY 面垂直的为 Z 轴;

电导率设置单元, 用于设置被测试件在 X 轴、 Y 轴和 Z 轴三个方向上的电导率。

9. 根据权利要求8所述的各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真系统, 所述表面波位移获取模块, 具体包括:

面内波数获取单元, 用于根据 $K_{RY} = \frac{\omega_{RY}}{v_{RY}}$, 计算所述表面波沿 Y 轴方向传播的面内波数 K_{RY} , 其中, K_{RY} 为所述表面波沿 Y 轴方向传播的面内波数, ω_{RY} 为所述表面波沿 Y 轴正方向的振动角频率, v_{RY} 为所述表面波沿 Y 轴传播的波速;

面内位移获取单元, 用于根据 $u(y,t) = -\frac{K_T K_{RY}}{2\mu_m \pi} \left(e^{-\alpha y} - \frac{2\alpha\beta}{K_{RY}^2 + \beta^2} e^{-\beta z} \right) e^{j(K_{RY}y - \omega_{RY}t)}$, 计算 t 时刻所述表面波沿 Y 轴的面内位移 $u(y,t)$;

其中, $u(y,t)$ 为被测试件中点 h 处的表面波在时刻 t 沿 Y 轴的面内位移, ω_{RY} 为表面波沿 Y

轴正方向的振动角频率, α 和 β 是表面波沿Z轴正方向的衰减系数, K_T 为横波波数, K_{RY} 为所述表面波沿Y轴正方向的波数, μ_m 为所述被测试件的Lame常数;

面外波数获取单元, 用于根据 $K_{RZ} = \frac{\omega_{RZ}}{v_{RZ}}$ 计算所述表面波沿Z轴方向传播的面外波数 K_{RZ} , 其中, K_{RZ} 为所述表面波沿Z轴方向传播的面外波数, ω_{RZ} 为所述表面波沿Z轴正方向的振动角频率, v_{RZ} 为所述表面波沿Z轴传播的波速;

面外位移获取单元, 用于根据 $u(z, t) = -\frac{jK_T}{2\mu_m\pi} \alpha \left(e^{-\alpha z} - \frac{2K_{RY}^2}{K_{RY}^2 + \beta^2} e^{-\beta z} \right) e^{j(K_{RZ}y - \omega_{RZ}t)}$ 计算t时刻所述表面波沿Z轴的面外位移 $u(z, t)$;

其中, $u(z, t)$ 为被测试件中点h处的表面波在时刻t沿Z轴的面外位移, ω_{RZ} 为表面波沿Z轴正方向的振动角频率, α 和 β 为表面波沿Z轴正方向的衰减系数, K_T 为横波波数, K_{RZ} 是所述表面波沿Y轴正方向的波数, μ_m 为所述被测试件的Lame常数。

10. 根据权利要求9所述的各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真系统, 所述表面波位移分布图获取模块, 具体包括:

第一灰度值获取单元, 用于根据公式 $G_y(m, n) = 255 \cdot \frac{u(y, t) - \min\{u(y, t) | y=0, 1, \dots, W; t=0, 1, \dots, T\}}{\max\{u(y, t) | y=0, 1, \dots, W; t=0, 1, \dots, T\} - \min\{u(y, t) | y=0, 1, \dots, W; t=0, 1, \dots, T\}}$ 计算所述表面波面内位移灰度图中像素 (m, n) 处的灰度值 $G_y(m, n)$;

面内位移分布图获取单元, 用于根据各所述灰度值 $G_y(m, n)$ 得到表面波面内位移分布图 G_y ;

其中, $G_y(m, n)$ 为所述表面波面内位移灰度图 G_y 中像素 (m, n) 处的灰度值; $\min\{u(y, t) | y=0, 1, \dots, W; t=0, 1, \dots, T\}$ 为所述表面波面内位移的最小值, $\max\{u(y, t) | y=0, 1, \dots, W; t=0, 1, \dots, T\}$ 为所述表面波面内位移的最大值, $u(y, t)$ 为被测试件中点h处的表面波在时刻t沿Y轴的面内位移;

第二灰度值获取单元, 用于根据公式 $G_z(m, n) = 255 \cdot \frac{u(z, t) - \min\{u(z, t) | z=0, 1, \dots, H; t=0, 1, \dots, T\}}{\max\{u(z, t) | z=0, 1, \dots, H; t=0, 1, \dots, T\} - \min\{u(z, t) | z=0, 1, \dots, H; t=0, 1, \dots, T\}}$ 计算所述表面波面外位移灰度图中像素 (m, n) 处的灰度值 $G_z(m, n)$;

面外位移分布图获取单元, 用于根据各所述灰度值 $G_z(m, n)$ 得到表面波面外位移分布图 G_z ;

其中, $G_z(m, n)$ 为所述表面波面外位移灰度图 G_z 中像素 (m, n) 处的灰度值; $\min\{u(z, t) | z=0, 1, \dots, H; t=0, 1, \dots, T\}$ 为所述表面波面外位移的最小值, $\max\{u(z, t) | z=0, 1, \dots, H; t=0, 1, \dots, T\}$ 为所述表面波面外位移的最大值, $u(z, t)$ 为被测试件中点h处的表面波在时刻t沿Z轴的面外位移。

一种各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及工业无损检测领域,特别是涉及一种各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真方法及系统。

背景技术

[0002] 感应式磁声(Magnetoacoustic Tomography with Magnetic Induction, MAT-MI)无损检测技术是一种绘制被测金属试件表面电导率分布图的无损检测新方法。其原理是将被测金属试件置于静磁场中,通过线圈引入交变磁场,试件中产生与交变磁场同频率的感应涡流;在感应涡流与静磁场的共同作用下,材料质点由于受到洛伦兹力的作用而引起周期性振动,并以超声波的形式向外传播,即磁声信号;利用电磁超声换能器在试件周围接收磁声信号并送入计算机内,可重建出试件表面的电导率空间分布,据此判断被测试件的缺陷情况并对其进行定位。

[0003] 目前,针对MAT-MI无损检测技术的研究大多是建立在被测材料电导率分布各向同性的前提下。但是在实际情况中,金属材料通常是各向异性介质。电导率各向异性对被测试件中感应涡流密度的分布、声源分布以及声压分布均有影响。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真方法及系统,通过改变各个方向上的电导率,精确地仿真电导率分布各向异性金属薄板表面的力分布和表面波位移。

[0005] 为实现上述目的,本发明提供了如下方案:

[0006] 一种各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真方法,所述仿真方法包括:

[0007] 建立电导率各向异性金属薄板仿真结构模型,所述仿真结构模型中包括仿真被测试件和仿真折线线圈;

[0008] 根据所述仿真结构模型,设置所述仿真被测试件不同方向的电导率;

[0009] 将所述仿真结构模型置于静磁场中进行仿真实验,得到感应涡流;

[0010] 根据所述感应涡流,确定所述被测试件受到的静态洛伦兹力和交变洛伦兹力;

[0011] 根据所述静态洛伦兹力和所述交变洛伦兹力得到表面波;

[0012] 根据各不同方向的电导率,计算所述表面波沿对应方向上的波速;

[0013] 根据表面波沿不同方向上的波速,得到对应方向上的表面波位移;

[0014] 根据各所述表面波位移,得到表面波位移分布图。

[0015] 可选的,所述根据所述仿真结构模型,设置所述被测试件不同方向的电导率,具体包括:

[0016] 基于所述被测试件建立三维笛卡尔直角坐标系,其中,以所述被测试件的表面中心为原点,与所述被测试件水平面平行的为X轴,与X轴垂直的为Y轴,与所述XOY面垂直的为Z轴;

[0017] 设置被测试件在X轴、Y轴和Z轴三个方向上的电导率。

[0018] 可选的,所述将所述仿真结构模型置于静磁场中,计算所述被测试件受到的静态洛伦兹力和交变洛伦兹力,具体包括:

[0019] 根据 $\mathbf{F}_s(\mathbf{h}, t) = -\sqrt{j\sigma\omega\mu_0} \mathbf{I} \mathbf{B}_s \int_0^\infty e^{-kz_0} J_0(k) J_0(kr) k dk$, 得到被测试件受到的静态洛伦兹力 $F_s(\mathbf{h}, t)$;

[0020] 其中, $F_s(\mathbf{h}, t)$ 为被测试件受到的静态洛伦兹力, σ 为电导率, μ_0 为空间磁导率, j 是虚部单位, B_s 为静磁场强度, z_0 为折线线圈与被测试件的垂直距离, k 为径向积分变量, I 为激励电流的幅值, ω 为激励电流的角频率, $J_0(k)$ 为自变量为 k 的第一类零阶Bessel函数, $J_0(kr)$ 为自变量为 kr 的第一类零阶Bessel函数。

[0021] 根据 $\mathbf{F}_d(\mathbf{h}, t) = -\mu_0 I^2 \int_0^\infty e^{-kz_0} J_0(k) J_0(kr) k dk \int_0^\infty e^{-kz_0} J_0(k) J_0(kr) k^2 dk$, 得到被测试件受到的交变洛伦兹力 $F_d(\mathbf{h}, t)$;

[0022] 其中, $F_d(\mathbf{h}, t)$ 为被测试件受到的交变洛伦兹力, μ_0 为空间磁导率, I 为激励电流的幅值, k 为径向积分变量, z_0 为折线线圈与被测试件的垂直距离, j 是虚部单位, $J_0(k)$ 为自变量为 k 的第一类零阶Bessel函数, $J_0(kr)$ 为自变量为 kr 的第一类零阶Bessel函数。

[0023] 可选的,所述根据所述电导率计算所述表面波沿不同方向的波速,具体包括:

[0024] 表面波的传播仅位于YOZ平面,与X轴无关;

[0025] 根据 $v_{RY} = \frac{0.87 + 1.12\sigma_y}{1 + \sigma_y} \sqrt{\frac{\mu_m}{\rho_m}}$, 得到所述表面波沿Y轴传播的波速 v_{RY} ;

[0026] 其中, v_{RY} 为所述表面波沿Y轴传播的波速, σ_y 为Y轴方向的电导率, μ_m 为所述被测试件的Lame常数, ρ_m 为所述被测试件的密度;

[0027] 根据 $v_{RZ} = \frac{0.87 + 1.12\sigma_z}{1 + \sigma_z} \sqrt{\frac{\mu_m}{\rho_m}}$, 得到所述表面波沿Z轴传播的波速 v_{RZ} ;

[0028] 其中, v_{RZ} 为所述表面波沿Z轴传播的波速, σ_z 为Z轴方向的电导率, μ_m 为所述被测试件的Lame常数, ρ_m 为所述被测试件的密度。

[0029] 可选的,所述根据所述波速得到所述表面波位移,具体包括:

[0030] 根据 $K_{RY} = \frac{\omega_{RY}}{v_{RY}}$ 计算所述表面波沿Y轴方向传播的面内波数 K_{RY} ;

[0031] 其中, K_{RY} 为所述表面波沿Y轴方向传播的面内波数, ω_{RY} 为所述表面波沿Y轴正方向的振动角频率, v_{RY} 为所述表面波沿Y轴传播的波速;

[0032] 根据 $u(y, t) = -\frac{K_T K_{RY}}{2\mu_m \pi} \left(e^{-\alpha y} - \frac{2\alpha\beta}{K_{RY}^2 + \beta^2} e^{-\beta y} \right) e^{j(K_{RY}y - \omega_{RY}t)}$, 计算 t 时刻所述表面波沿Y

轴的面内位移 $u(y, t)$;

[0033] 其中, $u(y, t)$ 为被测试件中点 h 处的表面波在时刻 t 沿Y轴的面内位移, ω_{RY} 为表面波沿Y轴正方向的振动角频率, α 和 β 是表面波沿Z轴正方向的衰减系数, K_T 为横波波数, K_{RY} 为所述表面波沿Y轴正方向的波数, μ_m 为所述被测试件的Lame常数;

[0034] 根据 $K_{RZ} = \frac{\omega_{RZ}}{v_{RZ}}$ 计算所述表面波沿Z轴方向传播的面外波数 K_{RZ} ;

[0035] 其中, K_{RZ} 为所述表面波沿 Z 轴方向传播的面外波数, ω_{RZ} 为所述表面波沿 Z 轴正方向的振动角频率, v_{RZ} 为所述表面波沿 Z 轴传播的波速;

[0036] 根据 $u(z,t) = -\frac{jK_T}{2\mu_m\pi} \alpha \left(e^{-\alpha z} - \frac{2K_{RY}^2}{K_{RY}^2 + \beta^2} e^{-\beta z} \right) e^{j(K_{RZ}y - \omega_{RZ}t)}$ 计算 t 时刻所述表面波沿 Z

轴的面外位移 $u(z,t)$;

[0037] 其中, $u(z,t)$ 为被测试件中点 h 处的表面波在时刻 t 沿 Z 轴的面外位移, ω_{RZ} 为表面波沿 Z 轴正方向的振动角频率, α 和 β 为表面波沿 Z 轴正方向的衰减系数, K_T 为横波波数, K_{RZ} 为所述表面波沿 Y 轴正方向的波数, μ_m 为所述被测试件的 Lamé 常数。

[0038] 可选的, 所述表面波位移分布图包括表面波面内位移分布图和表面波面外位移分布图;

[0039] 所述根据所述表面波位移得到表面波位移分布图, 具体包括:

[0040] 根据公式

[0041] $G_y(m,n) = 255 \cdot \frac{u(y,t) - \min\{u(y,t) | y=0,1,\dots,W; t=0,1,\dots,T\}}{\max\{u(y,t) | y=0,1,\dots,W; t=0,1,\dots,T\} - \min\{u(y,t) | y=0,1,\dots,W; t=0,1,\dots,T\}}$ 计

算所述表面波面内位移灰度图中像素 (m,n) 处的灰度值 $G_y(m,n)$;

[0042] 根据各所述灰度值 $G_y(m,n)$ 得到表面波面内位移分布图 G_y ;

[0043] 其中, $G_y(m,n)$ 为所述表面波面内位移灰度图 G_y 中像素 (m,n) 处的灰度值; $\min\{u(y,t) | y=0,1,\dots,W; t=0,1,\dots,T\}$ 为所述表面波面内位移的最小值, $\max\{u(y,t) | y=0,1,\dots,W; t=0,1,\dots,T\}$ 为所述表面波面内位移的最大值, $u(y,t)$ 为被测试件中点 h 处的表面波在时刻 t 沿 Y 轴的面内位移;

[0044] 根据公式

[0045] $G_z(m,n) = 255 \cdot \frac{u(z,t) - \min\{u(z,t) | z=0,1,\dots,H; t=0,1,\dots,T\}}{\max\{u(z,t) | z=0,1,\dots,H; t=0,1,\dots,T\} - \min\{u(z,t) | z=0,1,\dots,H; t=0,1,\dots,T\}}$ 计

算所述表面波面外位移灰度图中像素 (m,n) 处的灰度值 $G_z(m,n)$;

[0046] 根据各所述灰度值 $G_z(m,n)$ 得到表面波面外位移分布图 G_z ;

[0047] 其中, $G_z(m,n)$ 为所述表面波面外位移灰度图 G_z 中像素 (m,n) 处的灰度值; $\min\{u(z,t) | z=0,1,\dots,H; t=0,1,\dots,T\}$ 为所述表面波面外位移的最小值, $\max\{u(z,t) | z=0,1,\dots,H; t=0,1,\dots,T\}$ 为所述表面波面外位移的最大值, $u(z,t)$ 为被测试件中点 h 处的表面波在时刻 t 沿 Z 轴的面外位移。

[0048] 为实现上述目的, 本发明还提供了如下方案:

[0049] 一种各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真系统, 所述仿真系统包括:

[0050] 仿真结构模型建立模块, 用于建立电导率各向异性金属薄板仿真结构模型, 所述仿真结构模型中包括仿真被测试件和仿真折线圈;

[0051] 电导率设置模块, 用于根据所述仿真结构模型, 设置所述被测试件不同方向的电导率;

[0052] 感应涡流获取模块, 用于将所述仿真结构模型置于静磁场中进行仿真实验, 得到感应涡流;

[0053] 洛伦兹力确定模块, 用于根据所述感应涡流, 确定所述被测试件受到的静态洛伦

兹力和交变洛伦兹力；

[0054] 表面波获取模块,用于根据所述静态洛伦兹力和所述交变洛伦兹力得到表面波；

[0055] 波速计算模块,用于根据各不同方向的电导率,计算所述表面波沿对应方向上的波速；

[0056] 表面波位移获取模块,用于根据表面波沿不同方向上的波速,得到对应方向上的表面波位移；

[0057] 分布图获取模块,用于根据各所述表面波位移,得到表面波位移分布图。

[0058] 可选的,所述电导率设置模块,具体包括：

[0059] 直角坐标系单元,用于基于所述被测试件建立三维笛卡尔直角坐标系,其中,以所述被测试件的表面中心为原点,与所述被测试件水平面平行的为X轴,与X轴垂直的为Y轴,与所述XOY面垂直的为Z轴；

[0060] 电导率设置单元,用于设置被测试件在X轴、Y轴和Z轴三个方向上的电导率。

[0061] 可选的,所述表面波位移获取模块,具体包括：

[0062] 面内波数获取单元,用于根据 $K_{RY} = \frac{\omega_{RY}}{v_{RY}}$, 计算所述表面波沿Y轴方向传播的面内波数 K_{RY} , 其中, K_{RY} 为所述表面波沿Y轴方向传播的面内波数, ω_{RY} 为所述表面波沿Y轴正方向的振动角频率, v_{RY} 为所述表面波沿Y轴传播的波速；

[0063] 面内位移获取单元,用于根据 $u(y,t) = -\frac{K_T K_{RY}}{2\mu_m \pi} \left(e^{-\alpha y} - \frac{2\alpha\beta}{K_{RY}^2 + \beta^2} e^{-\beta z} \right) e^{j(K_{RY}y - \omega_{RY}t)}$, 计

算t时刻所述表面波沿Y轴的面内位移 $u(y,t)$ ；

[0064] 其中, $u(y,t)$ 为被测试件中点h处的表面波在时刻t沿Y轴的面内位移, ω_{RY} 为表面波沿Y轴正方向的振动角频率, α 和 β 是表面波沿Z轴正方向的衰减系数, K_T 为横波波数, K_{RY} 为所述表面波沿Y轴正方向的波数, μ_m 为所述被测试件的Lame常数；

[0065] 面外波数获取单元,用于根据 $K_{RZ} = \frac{\omega_{RZ}}{v_{RZ}}$ 计算所述表面波沿Z轴方向传播的面外波数 K_{RZ} , 其中, K_{RZ} 为所述表面波沿Z轴方向传播的面外波数, ω_{RZ} 为所述表面波沿Z轴正方向的振动角频率, v_{RZ} 为所述表面波沿Z轴传播的波速；

[0066] 面外位移获取单元,用于根据 $u(z,t) = -\frac{jK_T}{2\mu_m \pi} \alpha \left(e^{-\alpha y} - \frac{2K_{RY}^2}{K_{RY}^2 + \beta^2} e^{-\beta z} \right) e^{j(K_{RZ}z - \omega_{RZ}t)}$ 计

算t时刻所述表面波沿Z轴的面外位移 $u(z,t)$ ；

[0067] 其中, $u(z,t)$ 为被测试件中点h处的表面波在时刻t沿Z轴的面外位移, ω_{RZ} 为表面波沿Z轴正方向的振动角频率, α 和 β 为表面波沿Z轴正方向的衰减系数, K_T 为横波波数, K_{RZ} 是所述表面波沿Y轴正方向的波数, μ_m 为所述被测试件的Lame常数。

[0068] 可选的,所述表面波位移分布图获取模块,具体包括：

[0069] 第一灰度值获取单元,用于根据公式

[0070] $G_y(m,n) = 255 \cdot \frac{u(y,t) - \min\{u(y,t) | y=0,1,\dots,W; t=0,1,\dots,T\}}{\max\{u(y,t) | y=0,1,\dots,W; t=0,1,\dots,T\} - \min\{u(y,t) | y=0,1,\dots,W; t=0,1,\dots,T\}}$ 计

算所述表面波面内位移灰度图中像素 (m,n) 处的灰度值 $G_y(m,n)$ ；

[0071] 面内位移分布图获取单元,用于根据各所述灰度值 $G_y(m,n)$ 得到表面波面内位移分布图 G_y ;

[0072] 其中, $G_y(m,n)$ 为所述表面波面内位移灰度图 G_y 中像素 (m,n) 处的灰度值; $\min\{u(y,t)|y=0,1,\dots,W;t=0,1,\dots,T\}$ 为所述表面波面内位移的最小值, $\max\{u(y,t)|y=0,1,\dots,W;t=0,1,\dots,T\}$ 为所述表面波面内位移的最大值, $u(y,t)$ 为被测试件中点 h 处的表面波在时刻 t 沿 Y 轴的面内位移;

[0073] 第二灰度值获取单元,用于根据公式

$$[0074] \quad G_z(m,n) = 255 \cdot \frac{u(z,t) - \min\{u(z,t)|z=0,1,\dots,H;t=0,1,\dots,T\}}{\max\{u(z,t)|z=0,1,\dots,H;t=0,1,\dots,T\} - \min\{u(z,t)|z=0,1,\dots,H;t=0,1,\dots,T\}}$$

计算所述表面波面外位移灰度图中像素 (m,n) 处的灰度值 $G_z(m,n)$;

[0075] 面外位移分布图获取单元,用于根据各所述灰度值 $G_z(m,n)$ 得到表面波面外位移分布图 G_z ;

[0076] 其中, $G_z(m,n)$ 为所述表面波面外位移灰度图 G_z 中像素 (m,n) 处的灰度值; $\min\{u(z,t)|z=0,1,\dots,H;t=0,1,\dots,T\}$ 为所述表面波面外位移的最小值, $\max\{u(z,t)|z=0,1,\dots,H;t=0,1,\dots,T\}$ 为所述表面波面外位移的最大值, $u(z,t)$ 为被测试件中点 h 处的表面波在时刻 t 沿 Z 轴的面外位移。

[0077] 根据本发明提供的具体实施例,本发明公开了以下技术效果:

[0078] 本发明公开一种各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真方法,建立电导率各向异性金属薄板仿真结构模型;根据模型设置仿真被测试件不同方向的电导率;将模型置于静磁场中进行仿真实验,得到感应涡流;根据感应涡流,确定被测试件受到的静态洛伦兹力和交变洛伦兹力;根据静态洛伦兹力和交变洛伦兹力得到表面波;根据各不同方向的电导率,计算表面波沿对应方向上的波速;根据表面波沿不同方向上的波速,得到对应方向上的表面波位移;根据各表面波位移,得到表面波位移分布图,本发明的方法能够通过改变各个方向上的电导率,精确地仿真电导率分布各向异性金属薄板表面的力分布和表面波位移。

附图说明

[0079] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动性的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0080] 图1为本发明实施例各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真方法流程图;

[0081] 图2为本发明实施例仿真结构模型图;

[0082] 图3为本发明实施例直角坐标系图;

[0083] 图4为本发明实施例被测试件与直角坐标系的立体图;

[0084] 图5为本发明实施例各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真系统结构图。

具体实施方式

[0085] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于

本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0086] 本发明的目的是提供一种各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真方法及系统,通过改变各个方向上的电导率,精确地仿真电导率分布各向异性金属薄板表面的力分布和表面波位移。

[0087] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0088] 图1为本发明实施例各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真方法流程图。如图1所示,一种各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真方法,所述仿真方法包括:

[0089] 步骤101:建立电导率各向异性金属薄板仿真结构模型,所述仿真结构模型中包括仿真被测试件和仿真折线线圈;

[0090] 步骤102:根据所述仿真结构模型,设置所述被测试件不同方向的电导率;

[0091] 步骤103:将所述仿真结构模型置于静磁场中进行仿真实验,得到感应涡流;

[0092] 步骤104:根据所述感应涡流,确定所述被测试件受到的静态洛伦兹力和交变洛伦兹力;

[0093] 步骤105:根据所述静态洛伦兹力和所述交变洛伦兹力得到表面波;

[0094] 步骤106:根据各不同方向的电导率,计算所述表面波沿对应方向上的波速;

[0095] 步骤107:根据表面波沿不同方向上的波速,得到对应方向上的表面波位移;

[0096] 步骤108:根据各所述表面波位移,得到表面波位移分布图。

[0097] 其中,步骤102具体包括:

[0098] 基于所述被测试件建立三维笛卡尔直角坐标系,其中,以所述被测试件的表面中心为原点,与所述被测试件水平面平行的为X轴,与X轴垂直的为Y轴,与所述XOY面垂直的为Z轴;

[0099] 设置被测试件在X轴、Y轴和Z轴三个方向上的电导率。

[0100] 步骤103具体包括:

[0101] 根据 $F_s(\mathbf{h}, t) = -\sqrt{j\sigma\omega\mu_0}IB_s \int_0^\infty e^{-kz_0} J_0(k)J_0(kr)kdk$, 得到被测试件受到的静态洛伦兹力 $F_s(\mathbf{h}, t)$;

[0102] 其中, $F_s(\mathbf{h}, t)$ 为被测试件受到的静态洛伦兹力, σ 为电导率, μ_0 为空间磁导率, j 是虚部单位, B_s 为静磁场强度, z_0 为折线线圈与被测试件的垂直距离, k 为径向积分变量, I 为激励电流的幅值, ω 为激励电流的角频率, $J_0(k)$ 为自变量为 k 的第一类零阶Bessel函数, $J_0(kr)$ 为自变量为 kr 的第一类零阶Bessel函数。

[0103] 根据 $F_d(\mathbf{h}, t) = -\mu_0 I^2 \int_0^\infty e^{-kz_0} J_0(k)J_0(kr)kdk \int_0^\infty e^{-kz_0} J_0(k)J_0(kr)k^2 dk$, 得到被测试件受到的交变洛伦兹力 $F_d(\mathbf{h}, t)$;

[0104] 其中, $F_d(\mathbf{h}, t)$ 为被测试件受到的交变洛伦兹力, μ_0 为空间磁导率, I 为激励电流的幅值, k 为径向积分变量, z_0 为折线线圈与被测试件的垂直距离, j 是虚部单位, $J_0(k)$ 为自变量为 k 的第一类零阶Bessel函数, $J_0(kr)$ 为自变量为 kr 的第一类零阶Bessel函数。

[0105] 步骤106具体包括:

[0106] 表面波的传播仅位于YOZ平面,与X轴无关;

[0107] 根据 $v_{RY} = \frac{0.87 + 1.12\sigma_y}{1 + \sigma_y} \sqrt{\frac{\mu_m}{\rho_m}}$, 得到所述表面波沿Y轴传播的波速 v_{RY} ;

[0108] 其中, v_{RY} 为所述表面波沿Y轴传播的波速, σ_y 为Y轴方向的电导率, μ_m 为所述被测试件的Lame常数, ρ_m 为所述被测试件的密度;

[0109] 根据 $v_{RZ} = \frac{0.87 + 1.12\sigma_z}{1 + \sigma_z} \sqrt{\frac{\mu_m}{\rho_m}}$, 得到所述表面波沿Z轴传播的波速 v_{RZ} ;

[0110] 其中, v_{RZ} 为所述表面波沿Z轴传播的波速, σ_z 为Z轴方向的电导率, μ_m 为所述被测试件的Lame常数, ρ_m 为所述被测试件的密度。

[0111] 步骤107具体包括:

[0112] 根据 $K_{RY} = \frac{\omega_{RY}}{v_{RY}}$ 计算所述表面波沿Y轴方向传播的面内波数 K_{RY} ;

[0113] 其中, K_{RY} 为所述表面波沿Y轴方向传播的面内波数, ω_{RY} 为所述表面波沿Y轴正方向的振动角频率, v_{RY} 为所述表面波沿Y轴传播的波速;

[0114] 根据 $u(y, t) = -\frac{K_T K_{RY}}{2\mu_m \pi} \left(e^{-\alpha y} - \frac{2\alpha\beta}{K_{RY}^2 + \beta^2} e^{-\beta z} \right) e^{j(K_{RY}y - \omega_{RY}t)}$, 计算t时刻所述表面波沿Y

轴的面内位移 $u(y, t)$;

[0115] 其中, $u(y, t)$ 为被测试件中点h处的表面波在时刻t沿Y轴的面内位移, ω_{RY} 为表面波沿Y轴正方向的振动角频率, α 和 β 是表面波沿Z轴正方向的衰减系数, K_T 为横波波数, K_{RY} 为所述表面波沿Y轴正方向的波数, μ_m 为所述被测试件的Lame常数;

[0116] 根据 $K_{RZ} = \frac{\omega_{RZ}}{v_{RZ}}$ 计算所述表面波沿Z轴方向传播的面外波数 K_{RZ} ;

[0117] 其中, K_{RZ} 为所述表面波沿Z轴方向传播的面外波数, ω_{RZ} 为所述表面波沿Z轴正方向的振动角频率, v_{RZ} 为所述表面波沿Z轴传播的波速;

[0118] 根据 $u(z, t) = -\frac{jK_T}{2\mu_m \pi} \alpha \left(e^{-\alpha y} - \frac{2K_{RY}^2}{K_{RY}^2 + \beta^2} e^{-\beta z} \right) e^{j(K_{RZ}z - \omega_{RZ}t)}$ 计算t时刻所述表面波沿Z

轴的面外位移 $u(z, t)$;

[0119] 其中, $u(z, t)$ 为被测试件中点h处的表面波在时刻t沿Z轴的面外位移, ω_{RZ} 为表面波沿Z轴正方向的振动角频率, α 和 β 为表面波沿Z轴正方向的衰减系数, K_T 为横波波数, K_{RZ} 是所述表面波沿Y轴正方向的波数, μ_m 为所述被测试件的Lame常数。

[0120] 步骤108中, 所述表面波位移分布图包括表面波面内位移分布图和表面波面外位移分布图;

[0121] 根据公式

$$G_y(m, n) = 255 \cdot \frac{u(y, t) - \min\{u(y, t) | y = 0, 1, \dots, W; t = 0, 1, \dots, T\}}{\max\{u(y, t) | y = 0, 1, \dots, W; t = 0, 1, \dots, T\} - \min\{u(y, t) | y = 0, 1, \dots, W; t = 0, 1, \dots, T\}}$$

计算所述表面波面内位移灰度图中像素 (m, n) 处的灰度值 $G_y(m, n)$;

[0123] 根据各所述灰度值 $G_y(m, n)$ 得到表面波面内位移分布图 G_y ;

[0124] 其中, $G_y(m, n)$ 为所述表面波面内位移灰度图 G_y 中像素 (m, n) 处的灰度值; $\min\{u(y,$

t) $|y=0, 1, \dots, W; t=0, 1, \dots, T$ 为所述表面波面内位移的最小值, $\max\{u(y, t) | y=0, 1, \dots, W; t=0, 1, \dots, T\}$ 为所述表面波面内位移的最大值, $u(y, t)$ 为被测试件中点h处的表面波在时刻t沿Y轴的面内位移;

[0125] 根据公式

$$[0126] \quad G_z(m, n) = 255 \cdot \frac{u(z, t) - \min\{u(z, t) | z=0, 1, \dots, H; t=0, 1, \dots, T\}}{\max\{u(z, t) | z=0, 1, \dots, H; t=0, 1, \dots, T\} - \min\{u(z, t) | z=0, 1, \dots, H; t=0, 1, \dots, T\}}$$

计算所述表面波面外位移灰度图中像素(m, n)处的灰度值 $G_z(m, n)$;

[0127] 根据各所述灰度值 $G_z(m, n)$ 得到表面波面外位移分布图 G_z ;

[0128] 其中, $G_z(m, n)$ 为所述表面波面外位移灰度图 G_z 中像素(m, n)处的灰度值; $\min\{u(z, t) | z=0, 1, \dots, H; t=0, 1, \dots, T\}$ 为所述表面波面外位移的最小值, $\max\{u(z, t) | z=0, 1, \dots, H; t=0, 1, \dots, T\}$ 为所述表面波面外位移的最大值, $u(z, t)$ 为被测试件中点h处的表面波在时刻t沿Z轴的面外位移。

[0129] 本发明提供的仿真方法, 通过建立电导率各向异性金属薄板仿真结构模型; 根据模型设置仿真被测试件不同方向的电导率; 将模型置于静磁场中进行仿真实验, 得到感应涡流; 根据感应涡流, 确定被测试件受到的静态洛伦兹力和交变洛伦兹力; 根据静态洛伦兹力和交变洛伦兹力得到表面波; 根据各不同方向的电导率, 计算表面波沿对应方向上的波速; 根据表面波沿不同方向上的波速, 得到对应方向上的表面波位移; 根据各表面波位移, 得到表面波位移分布图, 能够通过改变各个方向上的电导率, 精确地仿真电导率分布各向异性金属薄板表面的力分布和表面波位移。

[0130] 图2为本发明实施例仿真结构模型图。如图2所示, 被测试件1是长方体金属薄板, 其厚度大于4倍的超声波长, 将其置于由永磁体2(如钕铁硼磁铁)提供的静磁场中, 同时将通入正弦交流电流的折线圈3置于待测试件上方, 试件相对于线圈足够大, 以避免产生边缘效应, 由电磁超声换能器4在被测试件周围接收磁声信号。

[0131] 图3为本发明实施例三维笛卡尔直角坐标系图。如图3所示, 对被测试件建立三维笛卡尔坐直角系OXYZ, 坐标原点O位于被测试件表面中心。被测试件的电导率张量为:

$$[0132] \quad \sigma = D^T \bar{\sigma} D$$

[0133] 其中D是旋转矩阵:

$$[0134] \quad D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \chi & -\sin \chi & 0 \\ \sin \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0135] 式中, γ 是各向异性走向角, ψ 是各向异性倾角, χ 是各向异性偏角。 $\bar{\sigma}$ 是被测试件的参考电导率张量:

$$[0136] \quad \bar{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}$$

[0137] 式中, σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别是X、Y、Z三个正交方向上的电导率。

[0138] 对被测试件施加沿Z轴负方向的静磁场5, 强度为 B_s 。折线圈3共有n折且相邻导线之间的间距为L, 折线圈3与被测试件1之间的垂直距离是 z_0 。将折线圈3简化为相互

平行且相互不连接的导线,其中通入与Z轴垂直的正弦交流电流作为激励电流:

$$[0139] \quad J_c(t) = Ie^{j\omega t}$$

[0140] 其中, $h = (x, y, z)$ 是三维直角坐标系OXYZ中一点的位置矢量; t 是时间; $J_c(t)$ 是时间 t 的激励电流强度; I 是激励电流的幅值; ω 是激励电流的角频率; j 是虚部单位。激励电流在被测试件周围产生交变磁场,其在时间 t 、位置 h 处的强度为 $B_d(h, t)$ 。

[0141] 线圈下方的作用区域包括 R_a 和 R_b 两部分。 R_a 中的点坐标满足 $0 < z < z_0$, R_a 中的磁矢势主要由线圈中的激励电流和被测试件的表面涡流引起,其计算公式为

$$[0142] \quad \begin{cases} \mathbf{A}_a(\mathbf{h}, t) = \mu_0 \int_0^\infty \left[\frac{I}{2} e^{k(z-z_0)} J_0(k) + L_k e^{-kz} \right] J_0(kr) dk \\ L_k = \frac{k\mu - \sqrt{k^2 + jq^2}}{k\mu + \sqrt{k^2 + jq^2}} \cdot \frac{I}{2} e^{-kz_0} J_0(k) \end{cases}$$

[0143] 其中, $A_a(h, t)$ 是 R_a 内位置 h 处在时刻 t 的磁矢势; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 是空间点 h 在 XOY 平面上的投影与坐标原点之间的距离; μ 是被测试件的磁导率; μ_0 是空间磁导率; k 是径向积分变量; j 是虚部单位; q 是虚部值; $J_0(\cdot)$ 是第一类零阶 Bessel 函数。

[0144] R_b 中的点坐标满足 $z \leq 0$, R_b 中的磁矢势由被测试件的表面涡流产生,其计算公式为

$$[0145] \quad \begin{cases} \mathbf{A}_b(\mathbf{h}, t) = \mu \int_0^\infty M_k e^{z\sqrt{k^2 + jq^2}} J_0(kr) dk \\ M_k = \frac{k}{k\mu + \mu\sqrt{k^2 + jq^2}} I e^{-kz_0} J_0(k) \end{cases}$$

[0146] 其中, $A_b(h, t)$ 是 R_b 内位置 h 处在时刻 t 的磁矢势。

[0147] 单折线圈在待测试件表面 h 处在时刻 t 产生的感应涡流为:

$$[0148] \quad \mathbf{J}_{1e}(\mathbf{h}, t) = -j\omega\sigma\mathbf{A}_b = -j\omega\sigma\mu\mu_0 I \int_0^\infty \frac{k}{k\mu + \sqrt{k^2 + jq^2}} \cdot e^{-kz_0} e^{z\sqrt{k^2 + jq^2}} J_0(k) J_0(kr) dk$$

[0149] 则 n 折线圈在待测试件表面 h 处在时刻 t 产生的感应涡流为:

$$[0150] \quad \mathbf{J}_e(h, t) = n\mathbf{J}_{1e}(h, t)$$

[0151] 感应涡流 J_e 分别与静磁场和交变磁场相互作用产生静态洛伦兹力和交变洛伦兹力,即为声源。具体计算方法是: $J_e(h, t)$ 与 B_s 相互作用在时刻 t 位置 h 处产生的静态洛伦兹力为:

$$[0152] \quad \mathbf{F}_s(\mathbf{h}, t) = -\sqrt{j\sigma\omega\mu_0} I \mathbf{B}_s \int_0^\infty e^{-kz_0} J_0(k) J_0(kr) k dk$$

[0153] $J_e(h, t)$ 与 $B_d(h, t)$ 在时刻 t 位置 h 处的轴向分量相互作用产生的交变洛伦兹力为:

$$[0154] \quad \mathbf{F}_d(\mathbf{h}, t) = -\mu_0 I^2 \int_0^\infty e^{-kz_0} J_0(k) J_0(kr) k dk \int_0^\infty e^{-kz_0} J_0(k) J_0(kr) k^2 dk$$

[0155] 被测试件 1 中的移动电荷在静态洛伦兹力和交变洛伦兹力的共同作用下产生周期性的振动,且以表面波的形式向外传播。表面波位移仅位于 YOZ 平面中,与 X 无关。在时刻 t 表面波沿 Y 和 Z 两个方向传播的面内位移和面外位移分别是:

$$[0156] \quad \begin{cases} u(y,t) = -\frac{K_T K_{RY}}{2\mu_m \pi} \left(e^{-\alpha y} - \frac{2\alpha\beta}{K_{RY}^2 + \beta^2} e^{-\beta y} \right) e^{j(K_{RY}y - \omega_{RY}t)} \\ u(z,t) = -\frac{jK_T}{2\mu_m \pi} \alpha \left(e^{-\alpha z} - \frac{2K_{RZ}^2}{K_{RZ}^2 + \beta^2} e^{-\beta z} \right) e^{j(K_{RZ}z - \omega_{RZ}t)} \end{cases}$$

[0157] 其中, $u(y, t)$ 是被测试件1中点h处的表面波在时刻t的面内位移; $u(z, t)$ 是被测试件1中点h处的表面波在时刻t的面外位移; $\omega_{RY} = \frac{\pi v_{RY}}{L}$ 是表面波沿Y轴正方向的振动角频率; $\omega_{RZ} = \frac{\pi v_{RZ}}{L}$ 是表面波沿Z轴正方向的振动角频率; L 是相邻线圈之间的间距; α 和 β 是表面波沿Z轴正方向的衰减系数:

$$[0158] \quad \begin{cases} \alpha = \sqrt{K_{RZ}^2 - K_L^2} \\ \beta = \sqrt{K_{RZ}^2 - K_T^2} \end{cases}$$

[0159] $K_{RY} = \frac{\omega_{RY}}{v_{RY}}$ 是表面波沿Y轴正方向的波数; $K_{RZ} = \frac{\omega_{RZ}}{v_{RZ}}$ 是表面波沿Z轴正方向的波数; $K_L = \frac{\omega_{RY}}{v_L}$ 是纵波波数; $K_T = \frac{\omega_{RY}}{v_T}$ 是横波波数; v_T 是横波波速:

$$[0160] \quad v_T = \sqrt{\frac{\mu_m}{\rho_m}}$$

[0161] v_L 是纵波波速:

$$[0162] \quad v_L = \sqrt{\frac{\lambda_m + 2\mu_m}{\rho_m}}$$

[0163] v_{RY} 和 v_{RZ} 分别是表面波沿Y轴正方向和Z轴正方向的波速:

$$[0164] \quad \begin{cases} v_{RY} \approx \frac{0.87 + 1.12\sigma_y}{1 + \sigma_y} \sqrt{\frac{\mu_m}{\rho_m}} \\ v_{RZ} \approx \frac{0.87 + 1.12\sigma_z}{1 + \sigma_z} \sqrt{\frac{\mu_m}{\rho_m}} \end{cases}$$

[0165] ρ_m 是被测试件的密度; λ_m 和 μ_m 是被测试件的Lame常数。

[0166] 将被测试件1表面各点处的表面波面内位移和面外位移曲线, 分别转化成灰阶为256的灰度图像 G_y 和 G_z 。具体方法如下:

[0167] 将被测试件1表面各点处的表面波面内位移为 $u(y, t)$, 其中 $y = 0, 1, \dots, W$, $t = 0, 1, \dots, T$, 图4为本发明实施例被测试件1与直角坐标系的立体图。如图4所示, W 是被测试件沿Y方向的宽度, T 是测量时间界限。则表面波面内位移灰度图 G_y 中像素 (m, n) 处的灰度值为

[0168]

$$G_y(m, n) = 255 \cdot \frac{u(y, t) - \min\{u(y, t) | y = 0, 1, \dots, W; t = 0, 1, \dots, T\}}{\max\{u(y, t) | y = 0, 1, \dots, W; t = 0, 1, \dots, T\} - \min\{u(y, t) | y = 0, 1, \dots, W; t = 0, 1, \dots, T\}}$$

[0169] 其中, $G_y(m, n)$ 是表面波面内位移灰度图 G_y 中像素 (m, n) 处的灰度值; $\min\{u(y, t) | y = 0, 1, \dots, W; t = 0, 1, \dots, T\}$ 和 $\max\{u(y, t) | y = 0, 1, \dots, W; t = 0, 1, \dots, T\}$ 分别是表面波

面内位移的最小值和最大值。

[0170] 被测试件表面各点处的表面波面外位移为 $u(z, t)$, 其中 $z=0, 1, \dots, H, t=0, 1, \dots, T$, 图4为本发明实施例被测试件与直角坐标系的立体图。如图4所示, H 是被测试件沿 Z 方向的厚度, T 是测量时间界限。则表面波面外位移灰度图 G_z 中像素 (m, n) 处的灰度值为

[0171]

$$G_z(m, n) = 255 \cdot \frac{u(z, t) - \min\{u(z, t) | z=0, 1, \dots, H; t=0, 1, \dots, T\}}{\max\{u(z, t) | z=0, 1, \dots, H; t=0, 1, \dots, T\} - \min\{u(z, t) | z=0, 1, \dots, H; t=0, 1, \dots, T\}}$$

[0172] 其中, $G_z(m, n)$ 是表面波面外位移灰度图 G_z 中像素 (m, n) 处的灰度值; $\min\{u(z, t) | z=0, 1, \dots, H; t=0, 1, \dots, T\}$ 和 $\max\{u(z, t) | z=0, 1, \dots, H; t=0, 1, \dots, T\}$ 分别是表面波面外位移的最小值和最大值。

[0173] 图5为本发明实施例一种各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真系统结构图。如图5所示, 一种各向异性金属薄板感应式磁声图像的仿真系统, 所述仿真系统包括:

[0174] 仿真结构模型建立模块201, 用于建立电导率各向异性金属薄板仿真结构模型, 所述仿真结构模型中包括仿真被测试件和仿真折线线圈;

[0175] 电导率设置模块202, 用于根据所述仿真结构模型, 设置所述被测试件不同方向的电导率;

[0176] 感应涡流获取模块203, 用于将所述仿真结构模型置于静磁场中进行仿真实验, 得到感应涡流;

[0177] 洛伦兹力确定模块204, 用于根据所述感应涡流, 确定所述被测试件受到的静态洛伦兹力和交变洛伦兹力;

[0178] 表面波获取模块205, 用于根据所述静态洛伦兹力和所述交变洛伦兹力得到表面波;

[0179] 波速计算模块206, 用于根据各不同方向的电导率, 计算所述表面波沿对应方向上的波速;

[0180] 表面波位移获取模块207, 用于根据表面波沿不同方向上的波速, 得到对应方向上的表面波位移;

[0181] 分布图获取模块208, 用于根据各所述表面波位移, 得到表面波位移分布图。

[0182] 其中, 所述电导率设置模块202, 具体包括:

[0183] 直角坐标系单元, 用于基于所述被测试件建立三维笛卡尔直角坐标系, 其中, 以所述被测试件的表面中心为原点, 与所述被测试件水平面平行的为 X 轴, 与 X 轴垂直的为 Y 轴, 与所述 XOY 面垂直的为 Z 轴;

[0184] 电导率设置单元, 用于设置被测试件在 X 轴、 Y 轴和 Z 轴三个方向上的电导率。

[0185] 所述表面波位移获取模块207, 具体包括:

[0186] 面内波数获取单元, 用于根据 $K_{RY} = \frac{\omega_{RY}}{V_{RY}}$, 计算所述表面波沿 Y 轴方向传播的面内

波数 K_{RY} , 其中, K_{RY} 为所述表面波沿 Y 轴方向传播的面内波数, ω_{RY} 为所述表面波沿 Y 轴正方向的振动角频率, V_{RY} 为所述表面波沿 Y 轴传播的波速;

[0187] 面内位移获取单元,用于根据 $u(y,t) = -\frac{K_T K_{RY}}{2\mu_m \pi} \left(e^{-\alpha z} - \frac{2\alpha\beta}{K_{RY}^2 + \beta^2} e^{-\beta z} \right) e^{j(K_{RY}y - \omega_{RY}t)}$,计

算t时刻所述表面波沿Y轴的面内位移u(y,t);

[0188] 其中,u(y,t)为被测试件中点h处的表面波在时刻t沿Y轴的面内位移, ω_{RY} 为表面波沿Y轴正方向的振动角频率, α 和 β 是表面波沿Z轴正方向的衰减系数, K_T 为横波波数, K_{RY} 为所述表面波沿Y轴正方向的波数, μ_m 为所述被测试件的Lame常数;

[0189] 面外波数获取单元,用于根据 $K_{RZ} = \frac{\omega_{RZ}}{v_{RZ}}$ 计算所述表面波沿Z轴方向传播的面外波数 K_{RZ} ,其中, K_{RZ} 为所述表面波沿Z轴方向传播的面外波数, ω_{RZ} 为所述表面波沿Z轴正方向的振动角频率, v_{RZ} 为所述表面波沿Z轴传播的波速;

[0190] 面外位移获取单元,用于根据 $u(z,t) = -\frac{jK_T}{2\mu_m \pi} \alpha \left(e^{-\alpha z} - \frac{2K_{RY}^2}{K_{RY}^2 + \beta^2} e^{-\beta z} \right) e^{j(K_{RZ}y - \omega_{RZ}t)}$,计

算t时刻所述表面波沿Z轴的面外位移u(z,t);

[0191] 其中,u(z,t)为被测试件中点h处的表面波在时刻t沿Z轴的面外位移, ω_{RZ} 为表面波沿Z轴正方向的振动角频率, α 和 β 为表面波沿Z轴正方向的衰减系数, K_T 为横波波数, K_{RZ} 是所述表面波沿Y轴正方向的波数, μ_m 为所述被测试件的Lame常数。

[0192] 所述表面波位移分布图获取模块208,具体包括:

[0193] 第一灰度值获取单元,用于根据公式

$$[0194] \quad G_y(m,n) = 255 \cdot \frac{u(y,t) - \min\{u(y,t) | y=0,1,\dots,W; t=0,1,\dots,T\}}{\max\{u(y,t) | y=0,1,\dots,W; t=0,1,\dots,T\} - \min\{u(y,t) | y=0,1,\dots,W; t=0,1,\dots,T\}}$$

计算所述表面波面内位移灰度图中像素(m,n)处的灰度值 $G_y(m,n)$;

[0195] 面内位移分布图获取单元,用于根据各所述灰度值 $G_y(m,n)$ 得到表面波面内位移分布图 G_y ;

[0196] 其中, $G_y(m,n)$ 为所述表面波面内位移灰度图 G_y 中像素(m,n)处的灰度值; $\min\{u(y,t) | y=0,1,\dots,W; t=0,1,\dots,T\}$ 为所述表面波面内位移的最小值, $\max\{u(y,t) | y=0,1,\dots,W; t=0,1,\dots,T\}$ 为所述表面波面内位移的最大值,u(y,t)为被测试件中点h处的表面波在时刻t沿Y轴的面内位移;

[0197] 第二灰度值获取单元,用于根据公式

$$[0198] \quad G_z(m,n) = 255 \cdot \frac{u(z,t) - \min\{u(z,t) | z=0,1,\dots,H; t=0,1,\dots,T\}}{\max\{u(z,t) | z=0,1,\dots,H; t=0,1,\dots,T\} - \min\{u(z,t) | z=0,1,\dots,H; t=0,1,\dots,T\}}$$

计算所述表面波面外位移灰度图中像素(m,n)处的灰度值 $G_z(m,n)$;

[0199] 面外位移分布图获取单元,用于根据各所述灰度值 $G_z(m,n)$ 得到表面波面外位移分布图 G_z ;

[0200] 其中, $G_z(m,n)$ 为所述表面波面外位移灰度图 G_z 中像素(m,n)处的灰度值; $\min\{u(z,t) | z=0,1,\dots,H; t=0,1,\dots,T\}$ 为所述表面波面外位移的最小值, $\max\{u(z,t) | z=0,1,\dots,H; t=0,1,\dots,T\}$ 为所述表面波面外位移的最大值,u(z,t)为被测试件中点h处的表面波在时刻t沿Z轴的面外位移。

[0201] 本说明书中各个实施例采用递进的方式描述,每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处,各个实施例之间相同相似部分互相参见即可。对于实施例公开的系统而言,由于其与实施例公开的方法相对应,所以描述的比较简单,相关之处参见方法部分说明即可。

[0202] 本文中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述,以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想;同时,对于本领域的一般技术人员,依据本发明的思想,在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处。综上所述,本说明书内容不应理解为对本发明的限制。

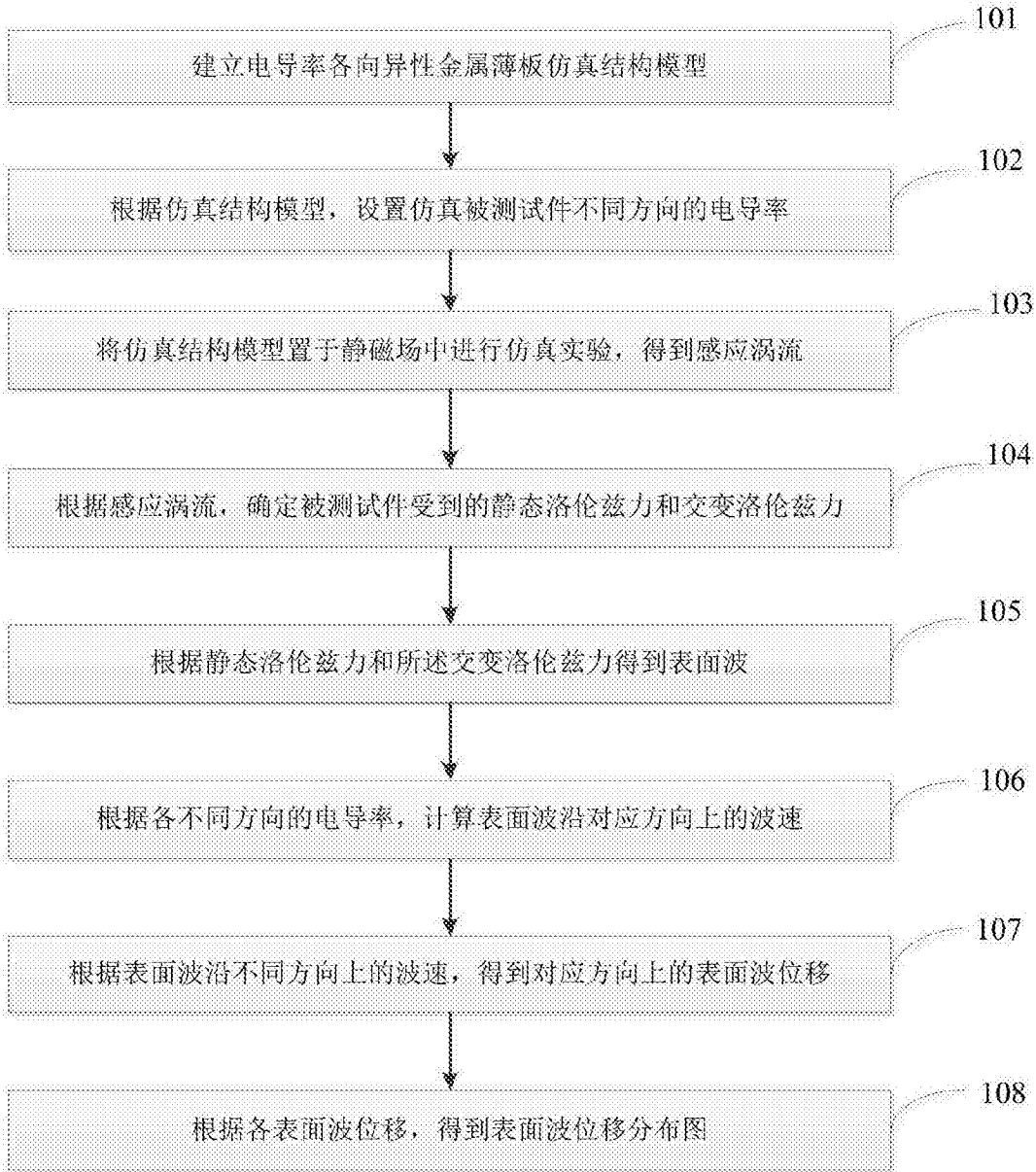


图1

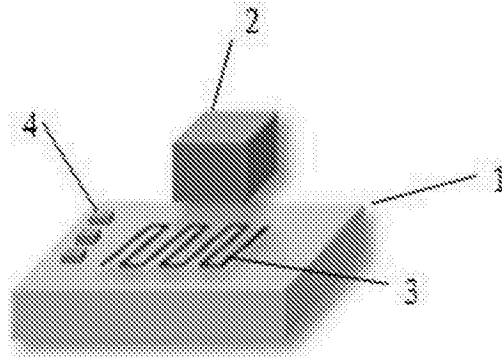


图2

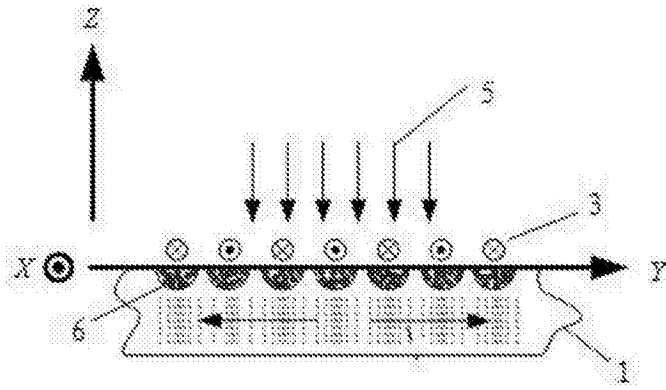


图3

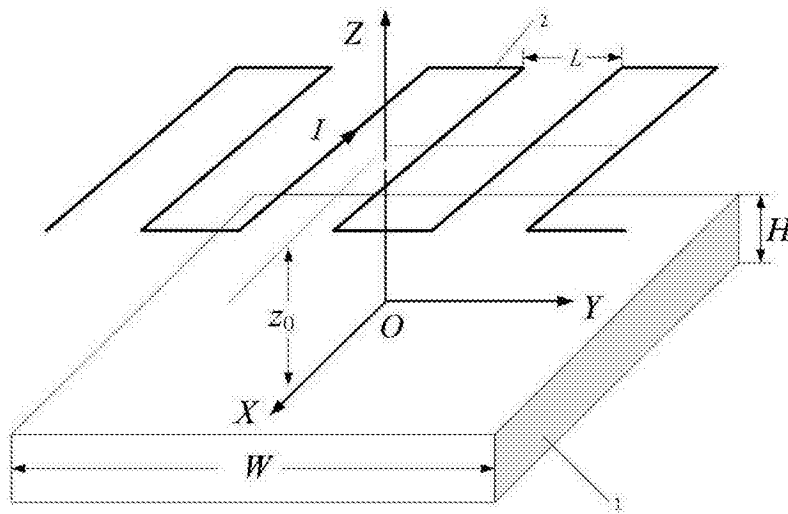


图4

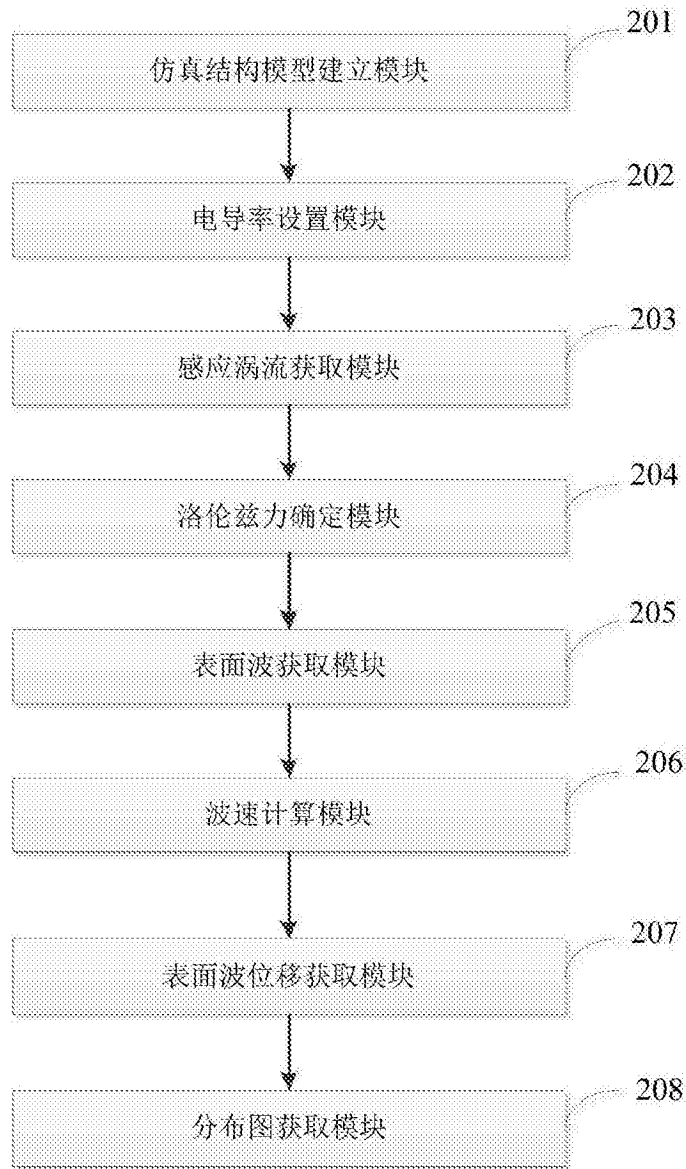


图5