

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210614

一种快速计算二维缺陷漏磁场的 有限元建模和求解方法^{*}

刘真伟, 韩文花, 杨 婷

(上海电力大学自动化工程学院 上海 200090)

摘 要:漏磁检测的速度快,灵敏度高,检测过程操作简单,是一种常用的铁磁材料无损检测方法,其中有限元模型被广泛用于漏磁检测中。有限元模型的求解精度高但是计算时间较长,因此,本文提出了一种快速计算二维缺陷漏磁场的有限元建模和求解方法,在保证精度的同时缩短计算时间。通过对有限元数值计算的理论推导,建立了漏磁场的有限元模型,首先采用六节点三角形单元划分网格,其次使用稀疏矩阵的形式求解方程组,再利用边界条件矩阵零空间的正交基求解出磁势。与 COMSOL 仿真软件的计算结果进行比较,表明本文所建模型是正确可行的。经过实测数据验证,该模型相比于传统有限元模型有明显的性能提升,精度上最大提高 83.49%,计算时间能减少 95.43%,为研究不规则缺陷的漏磁重构提供了快速有效的正演模型。

关键词:漏磁检测;正演模型;数值计算;有限元模型

中图分类号: TM153.1 TH878

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 430.25

Fast finite element modeling and solving method for 2D defect magnetic leakage field

Liu Zhenwei, Han Wenhua, Yang Ting

(College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The magnetic flux leakage detection is a common nondestructive detection method for ferromagnetic materials with high speed, high sensitivity and simple operation. The finite element model is widely used in magnetic flux leakage detection. The solution accuracy of the finite element model is high. But, the calculation time is long. Therefore, this article proposes a finite element modeling and solution method for fast calculation of 2D defect magnetic leakage field, which can reduce the calculation time while ensuring the accuracy. Through the theoretical derivation of finite element numerical calculation, the finite element model of magnetic leakage field is established. First, the six-node triangular element is used to divide the grid. Then, the sparse matrix is used to solve the equations, and the orthogonal basis of the zero space of the boundary condition matrix is used to solve the magnetic potential. The comparison with the calculation results of COMSOL simulation software shows that the formulated model is correct and feasible. Through the verification of actual testing data, this model has significantly improved performance compared with the traditional finite element model. The maximum accuracy is increased by 83.49%, and the calculation time can be reduced by 95.43%. A fast and effective forward model is provided for studying the magnetic flux leakage reconstruction of irregular defects.

Keywords: magnetic flux leakage detection; forward model; numerical calculation; finite element model

0 引 言

铁磁性材料在工作过程中由于磨损、腐蚀、氧化等原因,材料表面会出现裂纹、斑点、划痕等现象。为了避免

造成损失,通常会定期对材料进行检测。常用的无损检测包括超声检测^[1]、漏磁检测^[2]、红外检测^[3]、涡流检测^[4-5]等。随着研究的不断深入,如今无损检测已逐渐成为工业发展中必不可少的技术^[6-9]。其中,由于漏磁检测的结果可靠、容易操作等特点而被广泛使用。其原理是

收稿日期: 2022-10-21 Received Date: 2022-10-21

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(51906133)项目资助

通过对铁磁性材料进行磁化,从而在其表面缺陷处引起磁场变化形成漏磁场,通过提取漏磁场的信号来检测缺陷^[10-14]。

目前,漏磁检测中正演模型的作用是获取漏磁场的信号,常见的有神经网络模型、解析模型和有限元模型等。神经网络模型能建立缺陷与漏磁信号之间的映射关系,通过使用深度神经网络的模拟方法,直接预测磁场分布并以较少的学习参数进行有效映射^[15];或者对磁性材料表面形貌检测进行定量模拟研究,建立材料表面模型的函数关系^[16];还有使用新颖的视觉变换卷积神经网络模型,以克服传统方法在特征提取过程中的局限性^[17]。解析模型的假设多、计算量小,通常应用于规则缺陷的检测^[18],基于磁偶极子模型,通过对缺陷材料的剖分可以计算出缺陷漏磁场的分布情况^[19];还有通过对磁场空间积分的方法,建立了裂纹缺陷深度量化的解析解^[20];或者使用基于时间和空间正则化的异常检测模型,用于从漏磁检测中区分异常和背景磁场,提高异常检测的有效性^[21]。有限元模型能够实现对复杂缺陷的精确模拟^[22-23],通过建立有限元模型,利用轴向磁通密度改进主磁通检测的方法,可以有效地检测出钢丝绳的损伤^[24];通过改变模型中的励磁结构,来增强缺陷附近的漏磁信号^[25];或者采用有限元法建立考虑速度效应补偿的正演模型来模拟真实的物理过程,可以最大限度地保留信号的原始特征^[26-27]。为了提高缺陷表征的准确性,采用交流漏磁检测,并通过有限元仿真证明交流漏磁信号相位能够补偿信号强度对传感器离值的依赖^[28],再结合低频和高频激励的优点来检测材料表面和背面的缺陷^[29]。

随着无损检测技术的快速发展,一些学者通过引入深度场的概念,建立了将缺陷形状与漏磁信号相关联的物理模型和控制方程^[30];或者通过空间映射方法,将有限元模型转化为用磁偶极子模型为基础表示的解析模型^[31];还有学者提出单元磁偶极带叠加模型,能够快速计算不规则缺陷的漏磁信号^[32]。

在漏磁检测的正演模型中,有限元方法的计算精度高,从而被广泛使用,但是它的计算量大导致计算时间长,所以减少有限元正演模型的计算时间尤为重要。主要通过两种方法,1)通过简化有限元模型,提高迭代的速度^[33],2)采用优化算法减少迭代的次数^[34]。除此之外,还有通过由“精细”模型(例如:有限元模型)和“粗略”模型(例如:解析模型)组合的方式^[35],使得计算时间有所减少,但这些方法会使求解过程中的精度下降。

因此,本文提出了一种快速计算二维缺陷漏磁场的有限元建模和求解方法,通过对有限元数值计算的理论推导,建立了漏磁场的有限元模型,并验证了该模型的有效性和可行性,提高了有限元法的计算速度和精度,具有很大的灵活性。

1 正演问题的描述

漏磁检测的正演问题就是由已知缺陷求解漏磁场。由于漏磁检测的过程是处于静态或者是低速状态,因此通常认为在静态磁场中求解漏磁场是足够准确的。根据麦克斯韦方程组及相应的边界条件可确定电流密度在均匀介质中形成的稳定磁场和磁感应强度之间的关系,再通过引入磁势 A ,根据矢量分析,可以得到磁势 A 的偏微分方程,对于平面静态磁场,电流密度和磁势只有 x 和 y 两个分量,即:

$$\nabla^2 A_z = \frac{\partial A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial A_z}{\partial y^2} = -\mu J_z \quad (1)$$

式中: μ 为材料磁导率, J 为电流密度。对于静态磁场中偏微分方程问题,有两种边界条件选择:

Dirichlet 条件:在 Γ_1 上

$$hu = r \quad (2)$$

Neumann 条件:在 Γ_2 上

$$\vec{n} \cdot (c \nabla u) + qu = g \quad (3)$$

式中: h 和 r 是空间坐标的函数, u 是解, $\vec{n}$ 是外向单位法线, q 和 g 是定义在平面有界域上的函数。 Γ_1 表示求解域边界, Γ_2 表示求解域内部媒介的边界。

2 漏磁场的有限元数值计算

对已知缺陷的铁磁性材料来说,通过施加外部磁场,对其漏磁场的求解,就是对静态磁场的偏微分方程求解。通常采用有限元法,通过变分原理,将偏微分方程转换为条件变分问题。则由式(1)可得:

$$W(A_z) = \iint_{\Omega} \left\{ \frac{1}{2\mu} \left[\left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right)^2 \right] - J_z A_z \right\} dx dy + \quad (4)$$

$$\int_{\Gamma_2} (qu - g) ds = \min \quad (4)$$

$$\Gamma_1: hu = r \quad (5)$$

式中: Ω 是平面有界区域, $W(A_z)$ 称为能量泛函。通过有限元法求其近似解,最终可以得到漏磁场的磁感应强度分布。有限元数值计算分为4个步骤,其中区域的离散、选取插值函数和方程组的求解影响有限元法的计算精度和速度。传统的有限元法除了借助有限元分析软件,还借助 MATLAB 中 2D mesh 软件包(下文称之为传统有限元),但计算速度慢,很难为漏磁重构提供快速有效的正演模型,因此,本文提出了一种快速计算二维缺陷漏磁场的有限元建模和求解方法,同时进一步提高了计算精度。下面给出本文中有限元数值计算的具体步骤和理论推导。

2.1 区域的离散

在有限元分析中,通过对平面有界区域 Ω 进行网格划分可以形成若干个单元。本文采用的是三角形高次单元,如图1所示,也被称为六节点三角形单元。这种单元内部的磁势都不再是常量,而是按线性变化的,能更好地反映实际的磁势状态,从而所求磁势更为精确。

2.2 插值函数的选择

在图1所示的三角形单元中,任一点 P 的磁势 A_p 可以通过以下的线性插值得到:

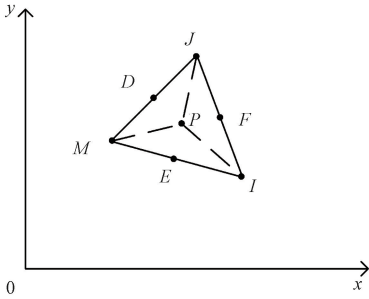


图1 六节点三角形单元

Fig.1 Six node triangular element

$$A_p = \frac{1}{S_1} \left[\left(\frac{a_I + b_I x + c_I y}{2} \left(\frac{a_I + b_I x + c_I y}{2} - 1 \right) \right) A_I + \left(\frac{a_J + b_J x + c_J y}{2} \left(\frac{a_J + b_J x + c_J y}{2} - 1 \right) \right) A_J + \left(\frac{a_M + b_M x + c_M y}{2} \left(\frac{a_M + b_M x + c_M y}{2} - 1 \right) \right) A_M + (a_J + b_J x + c_J y)(a_M + b_M x + c_M y) A_D + (a_M + b_M x + c_M y)(a_I + b_I x + c_I y) A_E + (a_I + b_I x + c_I y)(a_J + b_J x + c_J y) A_F \right] \quad (6)$$

$$\begin{cases} a_I = x_J y_M - x_M y_J, & b_I = y_J - y_M, & c_I = x_M - x_J \\ a_J = x_M y_I - x_I y_M, & b_J = y_M - y_I, & c_J = x_I - x_M \\ a_M = x_I y_J - x_J y_I, & b_M = y_I - y_J, & c_M = x_J - x_I \end{cases} \quad (7)$$

其中, S_1 为三角形 IJM 的面积, $A_I, A_J, A_M, A_D, A_E, A_F$ 分别为节点 I, J, M, D, E, F 的磁势, 定义:

$$\begin{cases} N_A = \frac{a_A + b_A x + c_A y}{2S_1} \left(\frac{a_A + b_A x + c_A y}{2S_1} - 1 \right) \\ N_D = \frac{a_J + b_J x + c_J y}{S_1} \frac{a_M + b_M x + c_M y}{S_1} \\ N_E = \frac{a_M + b_M x + c_M y}{S_1} \frac{a_J + b_J x + c_J y}{S_1} \\ N_F = \frac{a_I + b_I x + c_I y}{S_1} \frac{a_J + b_J x + c_J y}{S_1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $N_I, N_J, N_M, N_D, N_E, N_F$ 均为面积坐标表示的形函

数, 即插值函数, 则有:

$$A_p = N_I A_I + N_J A_J + N_M A_M + N_D A_D + N_E A_E + N_F A_F \quad (9)$$

若已知三角形单元上6个节点的磁势, 即可通过插值函数求出三角形单元内部任意一点的磁势。

2.3 方程组的建立

设 $\{\varphi_i\} (i=1, 2, \dots, D_e)$ 为 $\mathbf{A}$ 的 D_e 维子空间的基函数, 根据所划分单元可以将漏磁场的条件变分问题改写为:

$$\sum_{n=1}^{U_m} \iint_{e_n} \left\{ \frac{\varphi}{2\mu} \left[\left(\frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial y} \right)^2 \right] - \mathbf{J}_z \mathbf{A}_z \varphi \right\} dx dy = - \sum_{n=1}^{U_m} \int_{r_n} (qu\varphi - g\varphi) ds \quad (10)$$

其中, e_n 是任一单元区域, r_n 是单元的边界, D_e 和 U_m 分别是节点数和单元数。因此, 在每个单元上的积分计算为:

$$\iint_e \frac{\varphi}{2\mu} \left[\left(\frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy = \int_r qu\varphi ds = \{\mathbf{K}\}_e \{\boldsymbol{\delta}\}_e \quad (11)$$

$$\iint_e \mathbf{J}_z \mathbf{A}_z \varphi dx dy = \int_r g\varphi ds = \{\mathbf{F}\}_e \quad (12)$$

其中, $\{\boldsymbol{\delta}\}_e$ 是节点解, $\{\mathbf{F}\}_e$ 是边界值, $\{\mathbf{K}\}_e$ 是系数矩阵。将式(11) ~ (12) 代入到式(10)中, 为了方便计算, 把 $\{\boldsymbol{\delta}\}_e, \{\mathbf{F}\}_e, \{\mathbf{K}\}_e$ 扩充到与节点数一致的向量或矩阵再进行计算, 可以得到一个线性方程组:

$$\mathbf{KA} = \mathbf{F} \quad (13)$$

其中, $\mathbf{K}$ 为 $D_e \times D_e$ 有限元系数矩阵, $\mathbf{F}$ 为 $D_e \times 1$ 激励或边界值, $\mathbf{A}$ 为 $D_e \times 1$ 磁势。

2.4 方程组的求解

对式(13)进行求解, 只需要考虑对 Dirichlet 边界条件进行约束。因此有:

$$\mathbf{F} = \mathbf{N}_u^T \times \left((\mathbf{F} + g) - (\mathbf{K} + q) \times \mathbf{O}_r \times \frac{\mathbf{M}_c \times \mathbf{O}_r}{r} \right) \quad (14)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{N}_u^T \times (\mathbf{K} + q) \times \mathbf{N}_u \quad (15)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{N}_u \times \left(\frac{\mathbf{K}}{\mathbf{F}} \right) + \mathbf{O}_r \times \frac{\mathbf{M}_c \times \mathbf{O}_r}{r} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{M}_c$ 为包含边界条件的全局矩阵, $\{\mathbf{N}_u\} (u=1, 2, \dots, D_e)$ 是边界条件矩阵零空间的标准正交基, $\{\mathbf{O}_r\} (r=1, 2, \dots, D_e)$ 是适用于边界条件矩阵范围的标准正交基, 并且在整个求解过程中, $\mathbf{A}, \mathbf{F}, \mathbf{K}, \mathbf{H}$ 均为稀疏矩阵, 使用稀疏矩阵存储包含众多零值元素的数据, 可以节省大量内存并加快数据的处理速度。对漏磁场的求

解就是要得到漏磁场中的磁感应强度 B , 即:

$$\mathbf{B} = \nabla \mathbf{A} = \left[\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x}, -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right]^T \quad (17)$$

由式(17)便可求出所建模型的磁感应强度。本文通过有限元数值计算对整个平面有界区域进行求解,然后提取出缺陷上方 1 mm 处的磁感应强度,与实际检测中传感器安装位置一致。

区别于传统有限元法的地方主要体现在:首先采用六节点三角形单元划分网格,可以获得更多的网格节点数量,相比于传统有限元中三节点三角形单元,具有计算精度高的优点;其次使用稀疏矩阵的形式处理数据,相比于传统有限元中全矩阵的形式,能加快计算速度;最后利用边界条件矩阵零空间的正交基求解出磁势 $\mathbf{A}$,而在传统有限元法中,通过迭代的方式缩小误差,直到结果收敛,才能求解出磁势 $\mathbf{A}$,如果达到最大迭代次数还未收敛的话,需要重新划分网格,然后再进行迭代求解,这急剧增加了计算成本。

综上,本文所提出的模型理论上计算速度快并且计算精度高。

3 模型验证及分析

3.1 模型的可行性验证

为了验证本文提出的有限元数值计算理论推导的可行性,使用 PDE 工具箱建立了漏磁场的有限元模型,如图 2 所示。

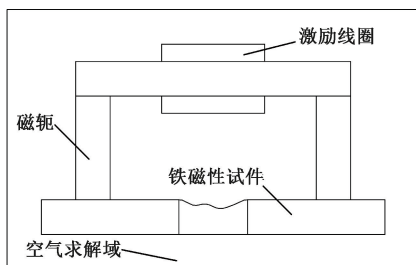


图2 漏磁场有限元模型

Fig. 2 The finite element model of magnetic leakage field

图3中包括已知缺陷的铁磁性试件、磁轭、激励线圈以及空气求解域。通常对待检测的材料使用局部磁化的方式,磁化电流选择直流。分别对规则缺陷与不规则缺陷进行建模,缺陷轮廓如图3所示,缺陷1是规则缺陷,宽度为 5 mm,深度为 3 mm;缺陷2是不规则缺陷,宽度为 10 mm,深度为 0~4 mm,检测范围为 30~70 mm,检测提离值为 1 mm,用向量 $\mathbf{D} = (d_1, d_2, d_3, \dots, d_{81})$ 表示,即缺陷采样点数为 81。

通过所建模型和 COMSOL 软件建模计算得到模型的磁势,如图4和5所示,图6和7分别为漏磁场的径向与轴向分量。其中,所建模型和 COMSOL 软件建模中铁

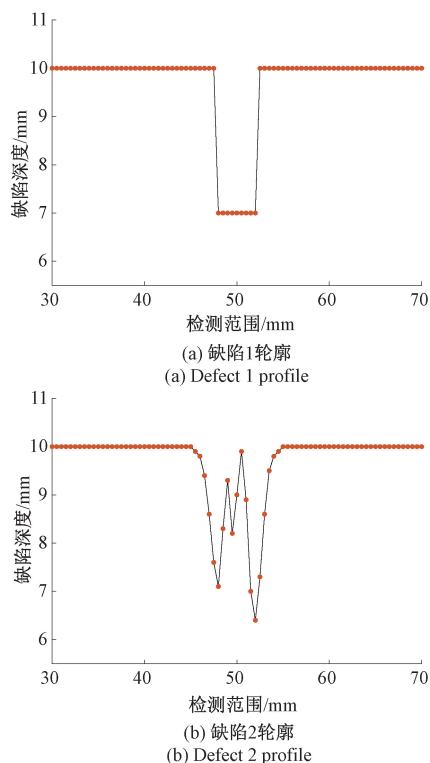


图3 两种不同形状缺陷

Fig. 3 Two different shape defects

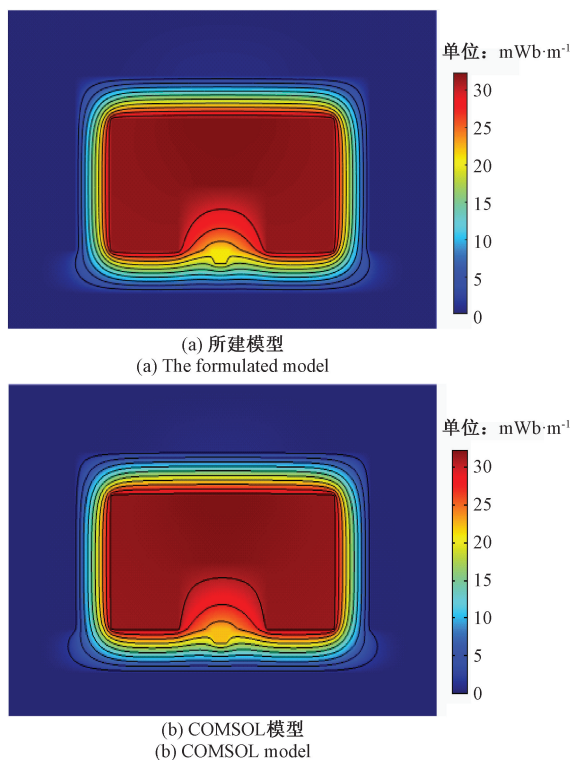


图4 缺陷1模型的磁势图

Fig. 4 Magnetic potential diagram of defect 1 model

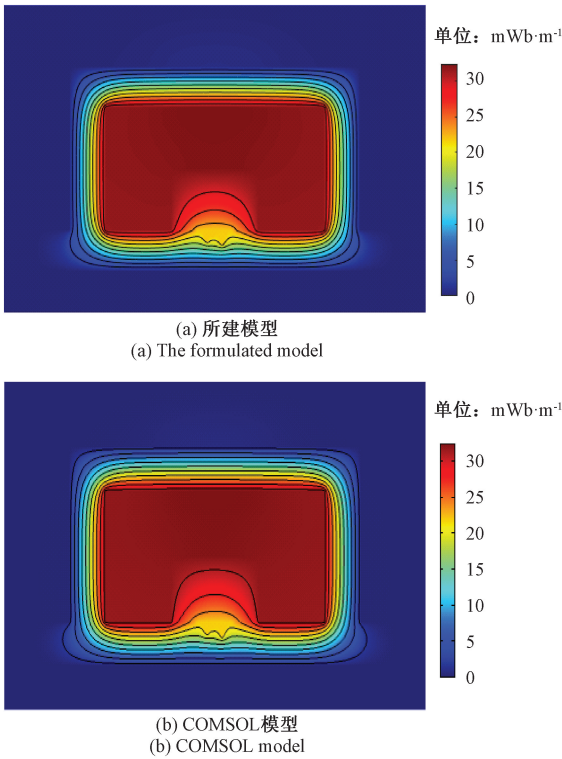


图5 缺陷2模型的磁势图

Fig. 5 Magnetic potential diagram of defect 2 model

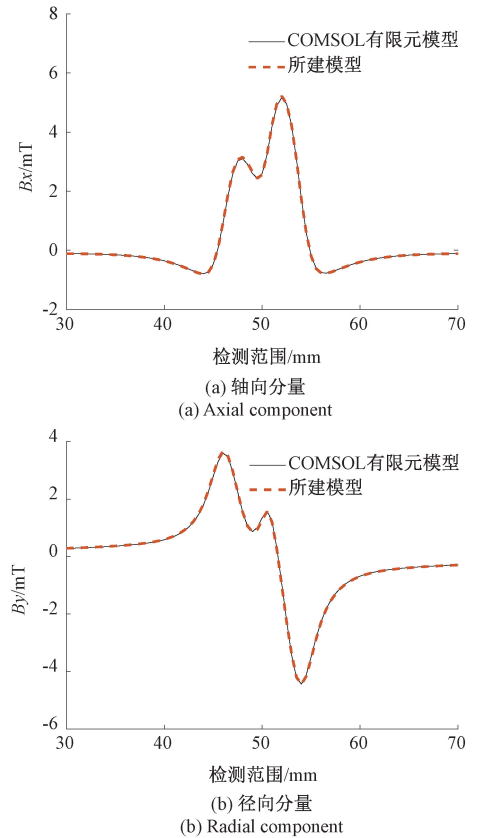


图7 缺陷2的漏磁场分量

Fig. 7 Leakage magnetic field component of defect 2

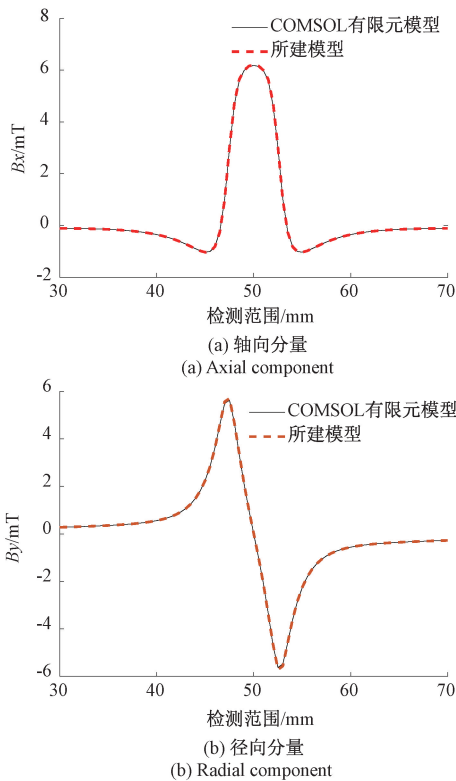


图6 缺陷1的漏磁场分量

Fig. 6 Leakage magnetic field component of defect 1

磁性试件的尺寸为 $100\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,激励线圈中的电流密度为 $1\,000\text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$,铁磁性试件和磁轭的相对磁导率为 500,空气域的相对磁导率为 1,边界上的磁势为 0,网格尺寸为 $0.1\sim 0.5\text{ mm}$ 。

图4和5中,每条曲线上的磁势是相等,而且所建模型与 COMSOL 计算得到的磁势都是在 $0\sim 30\text{ mWb/m}$ 之间。图6和7中,实线表示 COMSOL 计算的漏磁场分量,虚线表示所建模型的漏磁场分量,所建模型与 COMSOL 计算出的漏磁场分量在采样点上的变化规律是相同的,即缺陷1漏磁场的轴向分量存在一个最大值并且处于缺陷中心处,径向分量则存在一个最大值和一个最小值均处于缺陷的边缘处。由于缺陷2是一个不规则缺陷,所以它的轴向分量和径向分量都存在一定的抖动。从图4~7可以看出,相同条件下,所建模型和 COMSOL 计算得到磁势非常接近,提取出的轴向和径向分量也非常接近,表明建立的漏磁场有限元模型是正确的,同时也说明对有限元计算方法的理论推导是可行的。

为了进一步验证所建模型在缺陷宽度、深度、提离值变化时对漏磁场变化的影响,在实验中分别与 COMSOL 软件计算出的轴向分量进行比较,其中,模型参数和计算条件与缺陷1、2中所建模型一致。以缺陷1为例,当提

离值为和缺陷深度为 1 和 3 mm,缺陷宽度分别为 3、5、7 mm 时漏磁场轴向分量的比较,如图 8 所示。当提离值和缺陷宽度为 1 和 5 mm,缺陷深度分别为 2、4、6 mm 时漏磁场轴向分量的比较,如图 9 所示。当缺陷深度和宽度为 3 和 5 mm,提离值分别为 1、3、5 mm 时漏磁场轴向分量的比较,如图 10 所示。

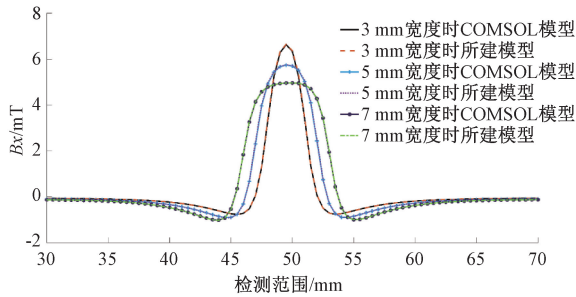


图 8 不同宽度时轴向分量的比较

Fig. 8 Comparison of axial components with different widths

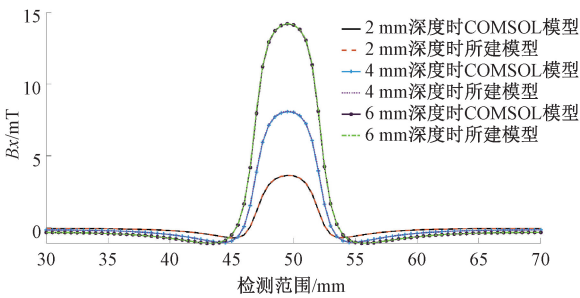


图 9 不同深度时轴向分量的比较

Fig. 9 Comparison of axial components at different depths

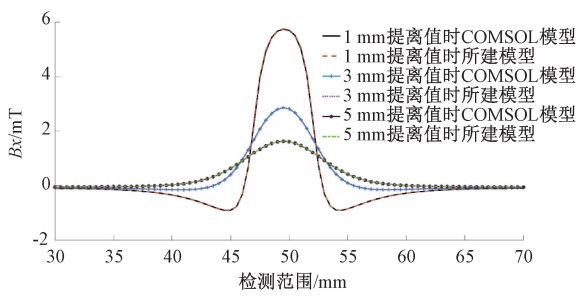


图 10 不同提离值时轴向分量的比较

Fig. 10 Comparison of axial components with different lift off values

图 8~10 中,所建模型与 COMSOL 软件得到的漏磁场轴向分量均完全重叠,图 8 中,缺陷宽度越大,漏磁场轴向分量的峰值就越小,同时轴向分量的变化部分就越宽。图 9 中,缺陷深度越深,漏磁场轴向分量的峰值就越大,而轴向分量的形状变化不大。图 10 中,随着提离值的增加,漏磁场轴向分量的峰值减小,缺陷边缘处的轴向

分量变化趋势减缓。因此,从图 8~10 可以看出,所建模型中的漏磁场轴向分量随着缺陷宽度、深度和检测提离值不同时变化情况与 COMSOL 软件中有限元模型完全一致,进一步验证了所建模型的可行性。

3.2 模型的有效性验证

为了验证模型的有效性,建立漏磁场有限元模型,并与传统有限元模型和 COMSOL 的计算结果进行比较。图 11 给出了缺陷 3,其宽度为 10 mm,深度为 0~3 mm,是一种不规则缺陷。其中采样点数为 81,检测范围是 30~70 mm,检测提离值为 1 mm。3 种模型计算出的漏磁信号如图 12 所示。

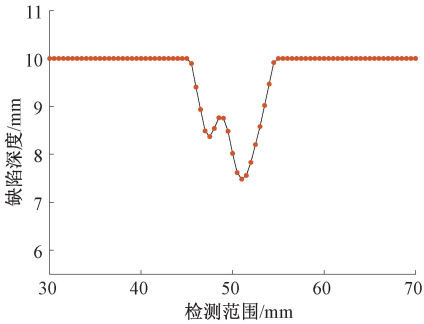
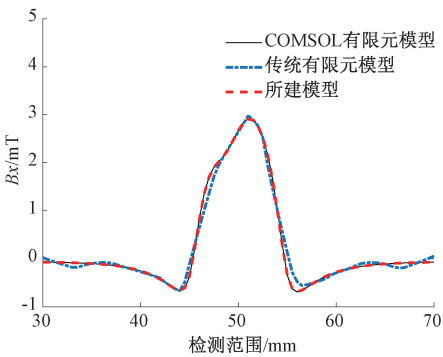
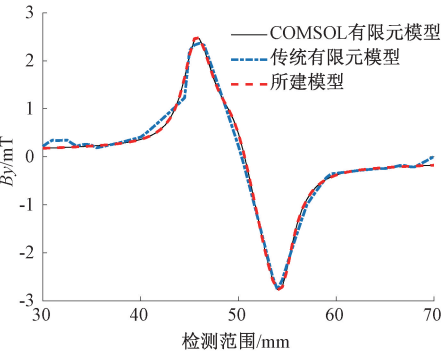


图 11 缺陷 3 轮廓

Fig. 11 Defect 3 profile



(a) Axial component



(b) Radial component

图 12 缺陷 3 漏磁场分量

Fig. 12 Leakage magnetic field component of defect 3

图 12 中,实线表示 COMSOL 中模型的漏磁场分量,虚线表示所建模型的漏磁场分量,点划线表示传统有限元模型的漏磁场分量。从图 11 和 12 可以看出,本文所建立的有限元前向模型的轴向和径向分量和 COMSOL

软件的计算结果非常接近;而传统有限元模型与 COMSOL 软件计算结果相比,出现了一些偏差,该偏差与模型的网格划分有关,表 1 给出了这 3 种模型的参数及实验性能指标。

表 1 模型参数及性能比较
Table 1 Model parameters and performance comparison

缺陷	比较	网格尺寸/mm	网格节点数量	RMSE	计算时间/s
缺陷 1	传统有限元模型	0.6	8 681	0.0315	77.01
	本文模型	0.1~0.5	165 597	0.001 7	3.67
	COMSOL 模型	0.1~0.5	185 485		10.00
缺陷 2	传统有限元模型	0.6	8 652	0.018 0	73.47
	本文模型	0.1~0.5	165 365	0.001 9	3.77
	COMSOL 模型	0.1~0.5	187 201		12.00
缺陷 3	传统有限元模型	0.6	8 662	0.013 9	79
	本文模型	0.1~0.5	165 765	0.001 3	4.1
	COMSOL 模型	0.1~0.5	188 357		11.00

表 1 中, RMSE 表示与 COMSOL 有限元模型计算结果的均方根误差。由于传统有限元模型在网格尺寸小于 0.6 mm 时, 计算该漏磁场需要消耗大量的计算时间甚至是无法求解, 所以该模型的网格尺寸设定为 0.6 mm。本文所建模型的 RMSE 相比于传统有限元模型更低, 同时耗时更短。以缺陷 3 为例, 传统有限元模型的网格节点数量为 8 662, RMSE 为 0.013 9, 计算时间为 79 s。本文所建有限元模型的网格尺寸为 0.1~0.5 mm, 网格节点数量为 165 765, RMSE 为 0.001 3, 计算时间为 4.1 s。传统有限元模型中网格节点数量仅仅是本文所建有限元模型的 5.2%, RMSE 是本文所建模型的 10 倍, 计算时间是本文所建模型的 19 倍。由图 12 和表 1 可知, 传统有限元模型采用三节点三角形进行网格划分, 网格节点数量少, 是导致出现偏差的主要原因, 同时它使用全局矩阵形式处理数据, 并用迭代法求解模型, 导致计算时间大大增加。本文所建的有限元模型采用六节点三角形进行网格划分, 可以获取更多的网格节点数据, 并采用稀疏矩阵的形式, 计算网格上的数据, 同时根据边界条件矩阵零空间的正交基求解模型, 因此既缩短了计算时间又使计算结果更加精确。

3.3 实测数据验证

通过实测数据来验证本文模型在漏磁检测的应用中是否稳定可靠。其中, 实测数据来自波兰格但斯克工业大学 Zbigniew 等^[36]公开的实验数据集, 该数据集包含不同速度效应下漏磁检测的原始信号, 检测装置如图 13 所示, 由磁化器、数字编码器和测量模块组成。测量模块有 10 个通道, 通过使用霍尔传感器扫描平行于 x 轴的相邻

测量线, 最终获得漏磁信号的二维分布。其中一个通道的传感器信号如图 14 所示, 检测 S355 钢材料上 4 组不同深度的裂缝。

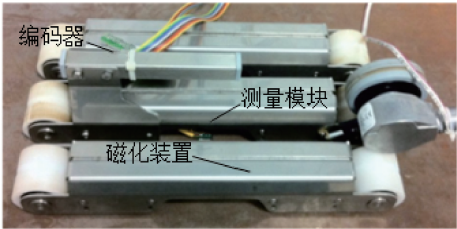


图 13 漏磁检测装置
Fig. 13 Magnetic flux leakage detector

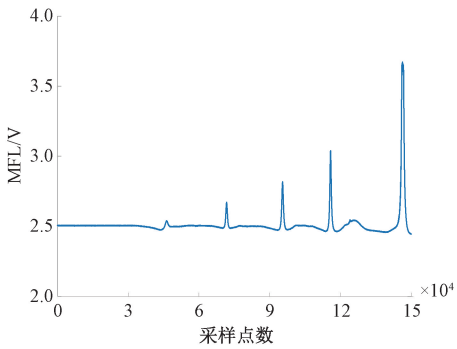


图 14 轴向漏磁信号
Fig. 14 Axial magnetic flux leakage signal

根据传感器的特性对数据进行处理可以得到实测信号。本文选择深度为 2 mm 的裂缝缺陷,通过所建立的有限元模型获得裂缝缺陷的预测信号,同时在 COMSOL 软件和传统有限元模型中获得该缺陷的漏磁信号,并与处理后的实测信号进行了对比,对比结果如图 15 所示。

由图 15 可以看出,本文所建模型、COMSOL 建模以及传统模型得到的漏磁信号与实测信号变化趋势相同,它们轴向分量峰值以及径向分量的峰值和谷值也都保持一致。为进一步验证本文模型对漏磁检测实际应用的适用性,使用这 3 种模型预测不同深度狭长裂缝的漏磁信号,比较预测结果与实测信号的均方根误差以及计算时间,如表 2 所示。从表中可以看出,本文模型预测的误差和 COMSOL 计算的误差基本一致,以 8 mm 裂缝为例,本文模型对径向分量预测的误差相比于传统模型预测的误差降低了 83.49%,耗费时间减少了 95.43%,相比于 COMSOL 仿真时间减少了 58.78%。结果表明,本文建立的有限元模型在漏磁检测的实际应用中同样的有效,不仅保证了计算精度,而且缩短了计算时间。

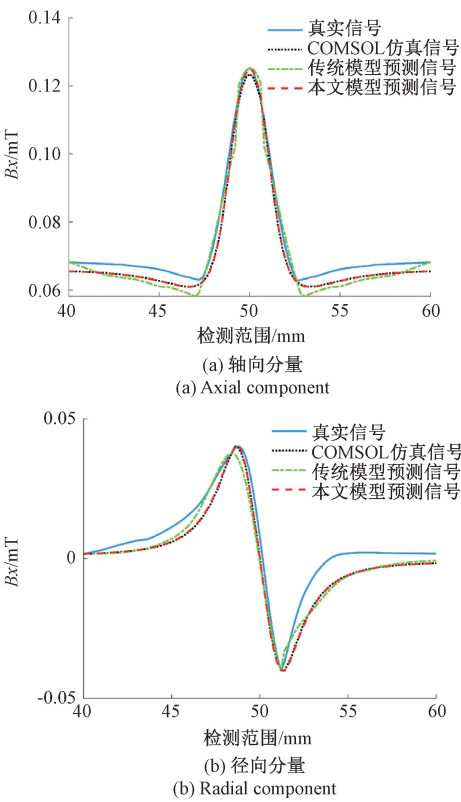


图 15 2 mm 裂缝漏磁场分量比较
Fig. 15 Comparison of leakage magnetic field components of 2 mm cracks

表 2 不同模型的预测性能

深度/mm		RMSE			时间/s		
		COMSOL	本文模型	传统模型	COMSOL	本文模型	传统模型
2	轴向	0.003 1	0.003 1	0.007 4	12	4.190 6	89.432 1
	径向	0.006 3	0.006 4	0.007 6			
4	轴向	0.004 9	0.004 9	0.013 5	11	3.848 9	90.582 4
	径向	0.006 8	0.006 9	0.017 8			
6	轴向	0.007 1	0.007 2	0.026 8	10	4.565 3	90.445 3
	径向	0.020 2	0.020 1	0.041 7			
8	轴向	0.017 7	0.018 3	0.052 0	10	4.122 0	90.233 6
	径向	0.008 9	0.008 8	0.053 3			

4 结 论

本文通过对漏磁场中偏微分方程数值计算的理论推导,建立了漏磁场的有限元模型。首先,采用六节点三角形单元划分平面有界区域,增加了网格节点数量,使得对整个区域中任一点处磁感应强度的插值更加准确;其次,对网格节点数据采用稀疏矩阵的形式进行计算,可以节

省大量内存并加快数据的处理速度;最后,根据边界条件矩阵零空间的正交基求解出磁势,提高了有限元法的计算速度。通过与 COMSOL 计算结果进行比较,验证了对有限元数值计算理论推导的可行性,同时研究了缺陷的宽度、深度、提离值对漏磁场轴向分量的影响,并与 COMSOL 计算得到的漏磁场轴向分量进行对比,进一步验证了所建模型的可行性;与传统有限元模型的参数及性能进行比较,验证了本文所建有限元模型计算速度快

和精度高的优点;经过实测数据的验证,本文模型在漏磁检测的实际应用中有着一定的适用性。由此,漏磁检测的正演问题可以通过有限元建模快速求解,对于反演问题,特别是三维不规则缺陷重构,将成为本文未来的研究重点。

参考文献

- [1] 宋寿鹏, 乔梦丽. 基于 NLFM Barker 编码的板材焊缝缺陷超声检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 246-254.
- SONG SH P, QIAO M L. Research on ultrasonic testing of plate weld flaw based on NLFM Barker coded excitation method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(4): 246-254.
- [2] 耿浩, 夏浩, 王国庆. 高速漏磁检测过程中管道内外壁缺陷定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 70-78.
- GENG H, XIA H, WANG G Q. Study on the defect location method of inner and outer wall of pipeline during high-speed magnetic flux leakage testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 70-78.
- [3] 周建民, 陈超, 涂文兵, 等. 红外热波技术、有限元与 SVM 相结合的复合材料分层缺陷检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 29-38.
- ZHOU J M, CHEN CH, TU W B, et al. Composite layer defect detection method based on infrared heat wave technology, finite element and SVM[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 29-38.
- [4] 张智超, 沈常宇, 朱周洪, 等. 漏磁结合涡流的非铁磁性金属材料探伤研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 150-159.
- ZHANG ZH CH, SHENG CH Y, ZHU ZH H, et al. Magnetic flux leakage combined with eddy current for non-ferromagnetic metal materials damage detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 150-159.
- [5] 殷晓康, 杨丽强, 王伟, 等. 外穿式集中绕组激励旋转电磁场涡流无损检测系统[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 239-250.
- YIN X K, YANG L Q, WANG W, et al. Encircling rotating field eddy current non-destructive evaluation system with concentrated excitation windings[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 239-250.
- [6] ZHANG J, LIAN Z H, ZHOU Z M, et al. Alternating current field measurement probe for coiled tubing inspection of arbitrary direction defects[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(1): 1-12.
- [7] LIU H, ZHAO C F, LIU Y H. Enhanced magnetic imaging for industrial metal workpiece detection through the combination of electromagnetic induction and magnetic anomalies[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-9.
- [8] 邓永乐, 王荣彪, 唐健, 等. 基于脉冲磁化的阵列磁桥式位移传感器[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 110-120.
- DENG Y L, WANG R B, TANG J, et al. Magnetic bridge type displacement sensor array in square pulse magnetization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 110-120.
- [9] 许宇帆, 贾银亮, 张润华, 等. 基于相关性的钢轨缺陷漏磁检测提离干扰抑制[J]. 电子测量技术, 2022, 45(4): 147-152.
- XU Y F, JIA Y L, ZHANG R H, et al. Method of lift-off interference suppression for rail defect magnetic leakage detection base on correlation[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(4): 147-152.
- [10] 刘桐, 刘斌, 冯刚, 等. 载荷作用下管道漏磁内检测信号定量化研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 262-273.
- LIU T, LIU B, FENG G, et al. Quantization of pipeline magnetic flux leakage detection signal under load[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 262-273.
- [11] 卢森襄, 神祥凯, 张俊楠, 等. 基于三轴融合的漏磁内检测数据缺陷反演方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 245-253.
- LU S X, SHEN X K, ZHANG J N, et al. Research on defect inversion method of magnetic flux leakage internal inspection data based on triaxial fusion[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 245-253.
- [12] 杨理践, 梁成壮, 高松巍, 等. 管道漏磁内检测的管壁缺陷漏磁场解析模型[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 106-114.
- YANG L J, LIANG CH ZH, GAO S W, et al. Analytical model of magnetic flux leakage field of pipe wall defects based on magnetic flux leakage internal detection[J].

- Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 106-114.
- [13] SUN H Y, PENG L S, HUANG S L, et al. Development of a physics-informed doubly fed cross-residual deep neural network for high-precision magnetic flux leakage defect size estimation [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(3): 1629-1640.
- [14] WU Z N, DENG Y M, LIU J H, et al. A reinforcement learning-based reconstruction method for complex defect profiles in MFL inspection [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-10.
- [15] LE M H, PHAM C T, LEE J Y. Deep neural network for simulation of magnetic flux leakage testing [J]. Measurement, 2021, 170: 108726.
- [16] LIU S W, SUN Y H, HE L S, et al. Quantitative MFL characterization study in hard magnetic material surface topography measurement [J]. Measurement, 2019, 135: 503-519.
- [17] LU S X, FENG J, ZHANG H G, et al. An estimation method of defect size from mfl image using visual transformation convolutional neural network [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(1): 213-224.
- [18] 杨宁祥, 刘秀成, 陈英红, 等. 斜拉索表层断丝缺陷漏磁检测圆环阵列传感器 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 123-128.
- YANG N X, LIU X CH, CHEN Y H, et al. Circular sensor array for surface flaws detection in stay cable based on magnetic flux leakage [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 123-128.
- [19] 李岩松, 刘启智, 刘君, 等. 基于磁偶极子模型的材料缺陷漏磁检测正演问题的单元积分计算方法 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 176-185.
- LI Y S, LIU Q ZH, LIU J, et al. The unit integral calculation method of defective material's forward question of magnetic flux leakage detection based on the magnetic dipole model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 176-185.
- [20] LONG Y, ZHANG J H, HUANG S L, et al. A novel crack quantification method for ultra-high-definition magnetic flux leakage detection in pipeline inspection [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(16): 16402-16413.
- [21] FU M R, LIU J H, ZANG D, et al. Anomaly detection of complex mfl measurements using low-rank recovery in pipeline transportation inspection [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(9): 6776-6786.
- [22] LONG Y, HUANG S L, PENG L S, et al. A characteristic approximation approach to defect opening profile recognition in magnetic flux leakage detection [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-12.
- [23] PIAO G Y, LI J Y, UDPA L, et al. Finite-element study of motion-induced eddy current array method for high-speed rail defects detection [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(12): 1-10.
- [24] LU S X, FENG J, LI F M, et al. Precise inversion for the reconstruction of arbitrary defect profiles considering velocity effect in magnetic flux leakage testing [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(4): 1-12.
- [25] OU Z Y, HAN Z D, DU D. Magnetic flux leakage testing for steel plate using pot-shaped excitation structure [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(9): 1-7.
- [26] ZHANG D L, ZHANG E C, PAN S M, et al. Fast quantitative method to detect the cross-sectional loss of wire rope defects [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-11.
- [27] ZBIGNIEW U, MAREK C, LESZEK P. Reduction of the velocity impact on the magnetic flux leakage signal [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2019, 38(1): 1-7.
- [28] HOSSEINGHOLIZADEH S, FILLETER T, SINCLAIR A N. Enhancement of defect characterization with ac magnetic flux leakage: Far-side defect shape estimation and sensor lift-off compensation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(5): 1-11.
- [29] WANG G, XIAO Q, GAO Z H. Multifrequency AC magnetic flux leakage testing for the detection of surface and backside defects in thick steel plates [J]. IEEE Magnetics Letters, 2022, 13: 1-5.
- [30] LI H M, HUANG R R, ZHAO C T, et al. 3D reconstructing of arbitrary defects with magnetic flux leakage testing signals [C]. 2020 IEEE Far East NDT New Technology and Application Forum (FENDT), 2020: 1-5.

- [31] 吴振宁,汪力行,刘金海. 基于空间映射的匀速采样漏磁检测复杂缺陷重构方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7):164-172.
WU ZH N, WANG L X, LIU J H. Space mapping based reconstruction of complex defects of MFL inspection under constant sampling speed [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(7):164-172.
- [32] 王坤,韩文花,王海航. 基于改进信赖域算法的三维不规则缺陷重构[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10):129-137.
WANG K, HAN W H, WANG H H. Reconstruction of three-dimensional irregular defects based on improved trust region algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42(10):129-137.
- [33] PRIEWALD R H, MAGELE C, LEDGER P D, et al. Fast magnetic flux leakage signal inversion for the reconstruction of arbitrary defect profiles in steel using finite elements[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(1):506-516.
- [34] HARI K C, NABI M, KULKARNI S V. Improved FEM model for defect-shape construction from MFL signal by using genetic algorithm[J]. IET Science Measurement Technology, 2007, 1(4):196-200.
- [35] CHEN J. 3D defect profile reconstruction from magnetic flux leakage signals in pipeline inspection using a hybrid inversion method[J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2017, 32(3):268-274.
- [36] ZBIGNIEW U, MAREK C, LESZEK P. Reduction of the velocity impact on the magnetic flux leakage signal[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2019, 38(1):1-7.

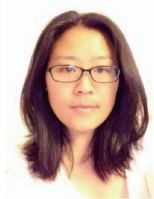
作者简介



刘真伟, 2020 年于安徽工程大学获得学士学位, 现为上海电力大学硕士研究生, 主要研究方向为无损检测和优化算法。

E-mail: liuzhenwei1213@126.com

Liu Zhenwei received his B.Sc. degree from Anhui Polytechnic University in 2020. He is currently a master student at Shanghai University of Electric Power. His main research interests include nondestructive testing and optimization algorithms.



韩文花 (通信作者), 2006 年于上海交通大学获得博士学位, 现为上海电力大学副教授, 主要研究方向为无损检测技术、智能优化算法和智能信息处理等。

E-mail: hanwenhua@shiep.edu.cn

Han Wenhua (Corresponding author) received her Ph.D. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2006. She is currently an associate professor at Shanghai University of Electric Power. Her main research interests include non-destructive testing technology, intelligent optimization algorithm and intelligent information processing, etc.



杨婷, 2015 年于上海交通大学获得博士学位, 现为上海电力大学讲师, 主要研究方向为反应堆热工水力及安全分析、核电厂模拟仿真程序模型开发及应用、无损检测等。

E-mail: yangting@shiep.edu.cn

Yang Ting received her Ph.D. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2015. She is currently a lecturer at Shanghai University of Electric Power. Her main research interests include reactor thermal hydraulic and safety analysis, development and application of nuclear power plant simulation program model, Non-destructive testing, etc.