

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2311980

# 基于坐标偏移磁偶极子-牛顿-拉夫逊法的 三维不规则缺陷重构方法

王雨菲, 韩文花

(上海电力大学自动化工程学院 上海 200090)

**摘要:**漏磁检测因其操作方便、对检测环境要求低、自动化程度高等特点,被广泛应用于铁磁性材料的缺陷检测中。而不规则缺陷漏磁重构的病态性导致重构结果精度低,特别是三维不规则缺陷的漏磁重构。因此,本文将三维缺陷的重构问题转化为二维缺陷重构问题,提出了坐标偏移磁偶极子前向模型,可以快速精确地计算任意复杂缺陷的漏磁信号,并使用牛顿-拉夫逊法,实现对三维不规则缺陷的重构。仿真和实验结果表明,本文所提重构算法相比于 Levenberg-Marquardt 重构算法有明显的精度提升,重构误差平均减少了约 41%,最大深度误差平均减少了 62%,实现了三维不规则缺陷的快速重构。

**关键词:**漏磁检测;缺陷重构;磁偶极子模型;牛顿-拉夫逊法

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

## 3D irregular defect reconstruction method based on coordinate offset magnetic dipole-Newton-Raphson method

Wang Yufei, Han Wenhua

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

**Abstract:** Magnetic flux leakage detection is widely used in the defect detection of ferromagnetic materials because of its convenient operation, low requirement of detection environment and high automation. However, the pathology of irregular defect leakage reconstruction leads to low accurate reconstruction results, especially the magnetic leakage reconstruction of 3D irregular defects. Therefore, the 3D defect reconstruction problem is transformed into the 2D defect reconstruction one in this study. A forward model based on coordinate offset magnetic dipole is proposed, which can quickly and accurately calculate the magnetic leakage signal of arbitrary complex defects, and the Newton-Raphson method is used to reconstruct three-dimensional irregular defects. The simulation and experimental results show that compared with the Levenberg-Marquardt reconstruction algorithm, the proposed reconstruction algorithm provides obvious accuracy improvement by reducing the average reconstruction errors of 41%, and average maximum depth errors of 62%, which realizes the rapid reconstruction of 3D irregular defects.

**Keywords:** magnetic leakage detection; defect reconstruction; magnetic dipole model; Newton-Raphson method

## 0 引言

漏磁检测作为无损检测的一种,被广泛应用于输油管道<sup>[1]</sup>、钢丝绳<sup>[2]</sup>、钢板<sup>[3]</sup>等铁磁性材料的缺陷检测和故障诊断<sup>[4]</sup>中。其原理是由于铁磁性材料的磁导率通常远大于空气的磁导率,铁磁性材料具有比空气更高的磁通密度<sup>[5]</sup>,试件经过磁化后,缺陷附近会形成漏磁场。通过传感器采集漏磁信号进行分析研究,重构出缺陷轮廓,是漏磁检测缺陷重构的主要内容。缺陷重构主要分为两部

分,可以精确计算漏磁信号的前向模型和用于重构缺陷轮廓的重构算法。

前向模型是在已知缺陷信息的情况下,预测估计缺陷漏磁信号,给出缺陷与漏磁场之间关系的模型。有限元是根据麦克斯韦方程组,将整个漏磁场进行网格划分,以变分原理为基础,将求解的微分方程问题转化为一组多元线性代数方程组<sup>[6]</sup>,进而求得所需漏磁信号的一种前向模型。将传统的三角形三节点网格划分改进为六节点,并用面积表示任意点的坐标,构建了二维快速有限元

前向模型<sup>[7]</sup>,可以快速精确地获得漏磁信号。有学者利用有限元原理,研究高速下产生的运动涡流对漏磁信号的影响<sup>[8]</sup>,提出了基于磁体的运动诱导涡流阵列检测方法<sup>[9]</sup>。考虑涡流效应,建立交流电磁场检测模型<sup>[10]</sup>。利用 COMSOL 有限元仿真软件,建立缺陷漏磁检测模型,研究励磁强度对于漏磁信号的影响<sup>[11]</sup>。磁偶极子是根据磁荷理论,直接得到漏磁场解析表达式。使用磁偶极子模型对无限长矩形凹槽的漏磁场进行建模,对漏磁信号进行增强处理研究<sup>[12]</sup>。基于磁滞理论,将应力引入磁偶极子模型,分析载荷作用下管道漏磁内检测信号<sup>[13]</sup>。将传播补偿因子引入磁偶极子模型,建立适用于计算长输油气管道外表面缺陷漏磁信号的前向模型<sup>[14]</sup>。对于三维不规则缺陷,建立了单元磁偶极带叠加模型<sup>[15]</sup>,可以快速获得三维不规则缺陷的漏磁信号。

重构算法是在已知缺陷漏磁信号的情况下,预测估计缺陷轮廓。迭代法作为经典的重构算法,是通过迭代减小预测漏磁信号与实际漏磁信号的误差来对缺陷进行重构,主要有群智能优化算法和确定性优化算法两类。利用单维粒子群算法<sup>[16]</sup>、改进布谷鸟搜索算法<sup>[17]</sup>等群智能算法可以重构出二维缺陷的轮廓。增强蚁群算法<sup>[18]</sup>和图像处理相结合,能够较清晰地重构出缺陷的表面边缘轮廓。高斯-牛顿法<sup>[19]</sup>、改进信赖域算法<sup>[15]</sup>等确定性优化算法可以对三维不规则缺陷进行快速重构<sup>[19]</sup>。近年来,随着深度学习的发展,大部分学者将其运用到漏磁检测中。对于不规则缺陷漏磁信号的特征难以充分、准确提取的问题,提出了一种基于异构多类特征融合的端到端的反演方法<sup>[20]</sup>。将经典重构方法的迭代过程嵌入到强化学习的学习过程中,避免了迭代过程中前向模型的重复调用<sup>[21]</sup>。将图像处理与卷积神经网络相结合,利用多图分裂和融合图卷积网络获得缺陷信息<sup>[22]</sup>。除此之外,还有将小波变换和数据融合相结合,有效避免了数据噪声对漏磁异常边缘检测的影响<sup>[23]</sup>。使用混合正则化 LSQR-Tikhonov 的重构算法可以得到缺陷的近似灰度轮廓<sup>[24]</sup>。或者根据漏磁信号的平均值与缺陷深度之间呈线性关系,重构出缺陷深度序列<sup>[25]</sup>。

在漏磁检测缺陷重构的研究中,漏磁信号的准确性和有效性是准确检测铁磁性材料的缺陷程度和位置的基础<sup>[26]</sup>。有限元可以获得缺陷的精确漏磁信号,但是计算量大,耗时长;磁偶极子可以快速获得漏磁信号,但精度低,且对于不规则缺陷具有局限性。而对于重构算法,由于实际缺陷普遍是由自然腐蚀、磨损或者人为造成,具有不规则性,导致重构过程是不适定的,难以获得精确轮廓。

因此,本文提出了一种坐标偏移磁偶极子前向模型,可以实现对不规则缺陷的漏磁信号计算;对于重构算法,使用改进牛顿-拉夫逊算法,经过仿真和实测数据都验证了算法的有效性。

## 1 坐标偏移磁偶极子前向模型

磁偶极子模型假设缺陷漏磁场是由一对极性相反的偶极子产生,其模型如式(1)和(2)所示。其局限性在于只能计算规则缺陷的漏磁信号。

$$B_x = \frac{\rho_s}{2\pi} \left[ \arctan \frac{d(x+w)}{(x+w)^2 + y(y+d)} - \arctan \frac{d(x-w)}{(x-w)^2 + y(y+d)} \right] \quad (1)$$

$$B_y = \frac{\rho_s}{4\pi} \ln \frac{[(x+w)^2 + (y+d)^2][(x-w)^2 + y^2]}{[(x-w)^2 + (y+d)^2][(x+w)^2 + y^2]} \quad (2)$$

式中:  $B_x$  为漏磁信号的轴向分量;  $B_y$  为漏磁信号的径向分量;  $\rho_s$  为面磁荷密度;  $w$  和  $d$  分别是缺陷的半宽和深度。在对漏磁信号进行采样时,传感器离缺陷表面有一定脱离距离,即变量  $y$ 。

如图1所示,将不规则缺陷划分成多个宽度相同、深度不同的规则矩形缺陷,一个矩形缺陷可视为一个磁偶极子,划分的宽度越小,模型的精度越高。对于每个矩形缺陷,通过移动  $y$  轴,构建新坐标系,使缺陷中心位于坐标原点,如图2所示。再利用磁偶极子模型计算该规则缺陷的磁感应强度。因此,坐标变换后一个磁偶极子在平面上任一点  $P(x, y)$  的磁感应强度两个方向的分量分别是:

$$B_x = \frac{\rho_s}{2\pi} \left[ \arctan \frac{d(x-a+w)}{(x-a+w)^2 + y(y+d)} - \arctan \frac{d(x-a-w)}{(x-a-w)^2 + y(y+d)} \right] \quad (3)$$

$$B_y = \frac{\rho_s}{4\pi} \ln \frac{[(x-a+w)^2 + (y+d)^2][(x-a-w)^2 + y^2]}{[(x-a-w)^2 + (y+d)^2][(x-a+w)^2 + y^2]} \quad (4)$$

式中:  $a$  为矩形缺陷中心的横坐标。

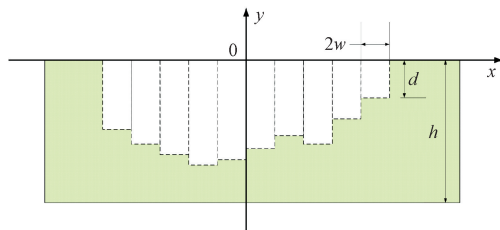


图1 不规则缺陷划分

Fig. 1 Irregular defect segmentation

由此,对于一个被划分成  $N$  个矩形缺陷的不规则缺陷,将每个磁偶极子在同一点处的磁感应强度叠加即可

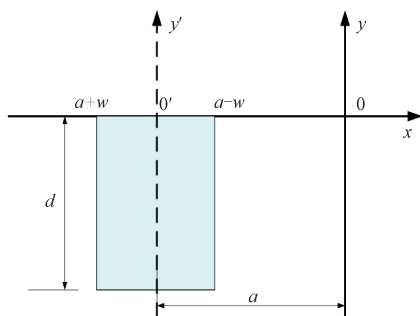


图2 单个磁偶极子坐标变换

Fig. 2 Coordinate transformation of a single magnetic dipole

得到该点的漏磁信号,即:

$$B_x = \sum_{i=1}^N \frac{\rho_s}{2\pi} \left[ \arctan \frac{d_i(x - a_i + w)}{(x - a_i + w)^2 + y(y + d_i)} - \arctan \frac{d_i(x - a_i - w)}{(x - a_i - w)^2 + y(y + d_i)} \right] \quad (5)$$

$$B_y = \sum_{i=1}^N \frac{\rho_s}{4\pi} \times \ln \frac{[(x - a_i + w)^2 + (y + d_i)^2][(x - a_i - w)^2 + y^2]}{[(x - a_i - w)^2 + (y + d_i)^2][(x - a_i + w)^2 + y^2]} \quad (6)$$

假设每个矩形缺陷表面光滑,面磁荷密度由式(7)计算得到。

$$\rho_s = 5.3H_0 \frac{d/w + 1}{d/(\mu w) + 1} \quad (7)$$

式中:  $H_0$  为磁化的磁场强度;  $\mu$  为试件的相对磁导率。

## 2 牛顿-拉夫逊缺陷重构算法

牛顿-拉夫逊(Newton-Raphson, NR)法是一种求解非线性方程的方法,它将非线性方程的求解转化为反复对相应的线性方程的求解。当NR法用于漏磁检测缺陷重构时,就是通过迭代优化,求解相应的线性方程组,最小化实测漏磁信号和预测漏磁信号之间的误差,使得缺陷的重构轮廓不断逼近真实轮廓。其基本思想为:

假设缺陷的真实轮廓用深度矩阵表示,即真解  $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ , 对应的实测漏磁信号为  $\hat{\mathbf{Y}} = [\hat{y}_1(\mathbf{X}), \hat{y}_2(\mathbf{X}), \dots, \hat{y}_n(\mathbf{X})]$ , 在第  $t$  次迭代时,重构的深度矩阵为  $\mathbf{X}' = [x'_1, x'_2, \dots, x'_n]$ , 相应的预测漏磁信号为  $\mathbf{Y} = [y_1(\mathbf{X}'), y_2(\mathbf{X}'), \dots, y_n(\mathbf{X}')]。$  为重构出缺陷的轮廓,应使预测信号与实测信号间的误差无限接近 0, 即:

$$\arg\min \{F(\mathbf{X}')\} = [\hat{\mathbf{Y}}(\mathbf{X}') - \mathbf{Y}(\mathbf{X}')]^T = [f_1(\mathbf{X}'), f_2(\mathbf{X}'), \dots, f_n(\mathbf{X}')]^T \approx 0 \quad (8)$$

式中:  $F(\mathbf{X}')$  表示预测漏磁信号和实测漏磁信号间的误差。由此可得如式(9)所示的关于预测信号和实测信号

误差的  $n$  维非线性方程组。

$$\begin{cases} f_1(\mathbf{X}') \approx 0 \\ f_2(\mathbf{X}') \approx 0 \\ \vdots \\ f_n(\mathbf{X}') \approx 0 \end{cases} \quad (9)$$

对于方程组的真解  $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ , 假设在第  $t$  次迭代时,  $\mathbf{X}'$  和真解之间的修正量为  $\Delta\mathbf{X}' = [\Delta x'_1, \Delta x'_2, \dots, \Delta x'_n]$ , 如果存在  $\Delta\mathbf{X}'$ , 将其加到  $\mathbf{X}'$  上, 使它等于真解, 即有:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}' - \Delta\mathbf{X}' \quad (10)$$

则式(9)的方程组变为:

$$F(\mathbf{X}) = F(\mathbf{X}' - \Delta\mathbf{X}') = 0 \quad (11)$$

将式(11)在  $\mathbf{X}'$  处按泰勒级数展开, 略去二次项和高次项, 得到如式(12)所示。

$$\begin{cases} f_1[x'_1, x'_2, \dots, x'_n] - \left[ \frac{\partial f_1}{\partial x'_1} \Delta x'_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x'_2} \Delta x'_2 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x'_n} \Delta x'_n \right] = 0 \\ f_2[x'_1, x'_2, \dots, x'_n] - \left[ \frac{\partial f_2}{\partial x'_1} \Delta x'_1 + \frac{\partial f_2}{\partial x'_2} \Delta x'_2 + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial x'_n} \Delta x'_n \right] = 0 \\ \vdots \\ f_n[x'_1, x'_2, \dots, x'_n] - \left[ \frac{\partial f_n}{\partial x'_1} \Delta x'_1 + \frac{\partial f_n}{\partial x'_2} \Delta x'_2 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x'_n} \Delta x'_n \right] = 0 \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} f_1[x'_1, x'_2, \dots, x'_n] \\ f_2[x'_1, x'_2, \dots, x'_n] \\ \vdots \\ f_n[x'_1, x'_2, \dots, x'_n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x'_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x'_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x'_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x'_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x'_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x'_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x'_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x'_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x'_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x'_1 \\ \Delta x'_2 \\ \vdots \\ \Delta x'_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

缩写为:

$$F(\mathbf{X}') = \mathbf{J}' [\Delta\mathbf{X}']^T \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{J}'$  表示第  $t$  次迭代时的雅可比矩阵。本文雅可比矩阵由差分法求得, 即:

$$\mathbf{J}' = \frac{\partial F(\mathbf{X}')}{\partial \mathbf{X}'} = \frac{F(\mathbf{X}' + \rho) - F(\mathbf{X}')}{\rho} \quad (15)$$

式中:  $\rho$  为一个极小量,  $\rho = 10^{-7}$ 。

因此, 非线性方程迭代一次后的解为  $\mathbf{X}^{t+1} = \mathbf{X}' - \Delta\mathbf{X}'$ , 其值已经逼近真解, 继续迭代直至  $\|\Delta\mathbf{X}'\| \leq \varepsilon$  (精度) 时, 停止迭代, 所得  $\mathbf{X}^{t+1}$  为所求的最逼近真解的近似解, 即可求得最逼近缺陷真实轮廓的重构轮廓。其中精度  $\varepsilon$  为数值很小的常数。为避免精度太小使算法进入死循环, 设定最大迭代次数, 当迭代次数达到最大迭代次数

时,停止迭代。

在理论推导过程中,由于略去了泰勒级数展开的二次项和高次项,会影响  $\Delta \mathbf{X}'$  的精确度。因此,定义阻尼因子  $\lambda' = \|\hat{\mathbf{Y}} - \mathbf{Y}(\mathbf{X}')\|_2$ , 使其根据实测信号和预测信号的误差变化进行自适应调整,则修正量方程式变为:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}') = [\mathbf{J}' + \lambda' \mathbf{I}] \Delta \mathbf{X}' \quad (16)$$

式中:  $\mathbf{I}$  是和雅可比矩阵同阶的单位阵。减少了泰勒展开产生的误差,提高重构精度。

为便于观察算法迭代过程中的收敛性,设置目标函数如下:

$$G(\mathbf{X}') = \sqrt{\sum_{i=1}^n [\hat{y}_i(\mathbf{X}') - y_i(\mathbf{X}')]^2} \quad (17)$$

综上,改进的 NR 重构算法具体包括以下步骤:

1) 初始化缺陷的重构轮廓即深度矩阵  $\mathbf{X}^0$ , 设定最大迭代次数  $T_{\max}$  和精度  $\varepsilon = 10^{-7}$ 。

2) 用坐标偏移磁偶极子模型计算当前缺陷轮廓  $\mathbf{X}'$  的预测漏磁信号,分别利用式(16)和(17)计算修正量和目标函数。若  $\Delta \mathbf{X}'$  达到精度,停止迭代,输出当前重构轮廓作为最终重构轮廓;否则执行下一步。

3) 若迭代次数达到最大迭代次数,算法停止迭代,输出当前重构轮廓作为最终重构轮廓;否则执行下一步。

4) 更新缺陷轮廓,即  $\mathbf{X}^{t+1} = \mathbf{X}' - \Delta \mathbf{X}'$ ,  $\mathbf{X}^{t+1}$  中的每一

个参数  $x_i^t$  满足边界约束  $x_i^t = \begin{cases} 0, & x_i^t < 0 \\ x_i^t - \Delta x_i^t, & x_i^t \in [0, h] \\ h, & x_i^t > h \end{cases}$ , 其

中  $h$  为试件厚度。迭代次数加 1, 返回步骤 2)。

综上,改进的 NR 重构算法是根据实测漏磁信号与预测漏磁信号的误差计算修正量,用修正量更新重构轮廓,更新后的重构轮廓代入到坐标偏移磁偶极子模型中计算新的预测漏磁信号,新的预测漏磁信号与实测漏磁信号的误差用于计算新的修正量,如此循环,直至算法停止迭代,最终的重构轮廓即为缺陷重构结果。由于重构算法每次迭代只计算更新一次缺陷的重构轮廓,且修正量由修正量方程式决定,不具有随机性,所以最终的重构结果具有唯一性。

### 3 实验结果和分析

#### 3.1 前向模型验证

为验证本文所提方法的有效性,使用 COMSOL 有限元仿真软件对不规则缺陷进行建模。COMSOL 的仿真结果作为实测漏磁信号,与本文模型和有限元模型计算的漏磁信号相比较,其中本文模型划分的矩形宽度为 0.5 mm,有限元模型由 MATLAB mesh 2D 软件包搭建。缺陷轮廓如图 3 所示,图 3 中缺陷 1 宽度为 10 mm,深度

为 0~3 mm,缺陷 2 宽度为 20 mm,深度为 0~7 mm。两个缺陷漏磁信号的轴向分量和径向分量如图 4 和 5 所示。从图 4 和 5 中可以看出,本文前向模型的漏磁信号的两个分量和 COMSOL 的各个分量的拟合度较高。

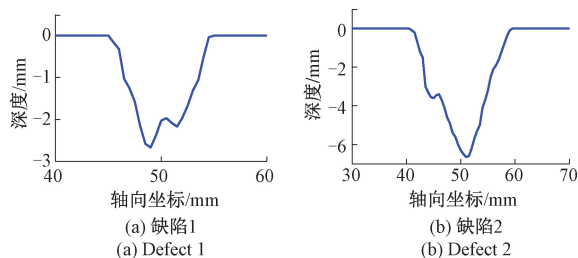


图 3 缺陷 1 和缺陷 2 实际轮廓

Fig. 3 Realistic contour of defect 1 and 2

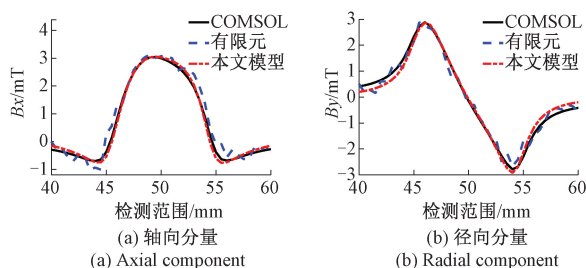


图 4 缺陷 1 漏磁信号

Fig. 4 Magnetic leakage signal of defect 1

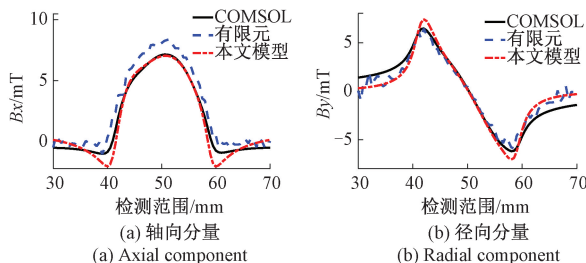


图 5 缺陷 2 漏磁信号

Fig. 5 Magnetic leakage signal of defect 2

对于相同缺陷,不同前向模型的性能比较如表 1 所示,表 1 中 RMSE 表示以 COMSOL 计算结果作为基准,有限元模型和本文模型计算结果的均方根误差。由于有限元模型当网格尺寸小于 0.6 mm 时,计算时间急剧增加甚至导致漏磁信号无法求解,所以有限元模型的网格尺寸取 0.6 mm。从表 1 中可以看出,相较有限元模型和 COMSOL,本文模型在计算时间上有很大提升,且本文模型的均方误差约为有限元模型的 45%。因此,坐标偏移磁偶极子模型相较有限元模型,计算耗时短,精度高。

为验证本文模型在缺陷宽度、深度和提离值变化时漏磁信号的变化。以矩形缺陷的漏磁信号轴向分量为



表 1 前向模型性能比较

Table 1 Comparison of forward model performance

| 缺陷   | 模型     | 网格尺寸<br>/mm | 网格节点数量  | 时间/s           | RMSE           |
|------|--------|-------------|---------|----------------|----------------|
| 缺陷 1 | 有限元    | 0.6         | 8 662   | 19.482 3       | 0.269 4        |
|      | COMSOL | 0.1~0.5     | 191 369 | 4.000 0        | —              |
|      | 本文模型   | —           | —       | <b>0.004 1</b> | <b>0.103 8</b> |
| 缺陷 2 | 有限元    | 0.6         | 8 662   | 19.588 0       | 1.295 7        |
|      | COMSOL | 0.1~0.5     | 191 773 | 6.000 0        | —              |
|      | 本文模型   | —           | —       | <b>0.004 9</b> | <b>0.762 9</b> |

例,用 COMSOL 构建相同的模型作为基准与本文模型进行比较,当提离值为 1、3、5 mm,宽度和深度不变时,漏磁信号变化如图 6 所示;当宽度为 5、10、15 mm,提离值和深度不变时,漏磁信号变化如图 7 所示;当深度为 3、5、7 mm,提离值和宽度不变时,漏磁信号变化如图 8 所示。

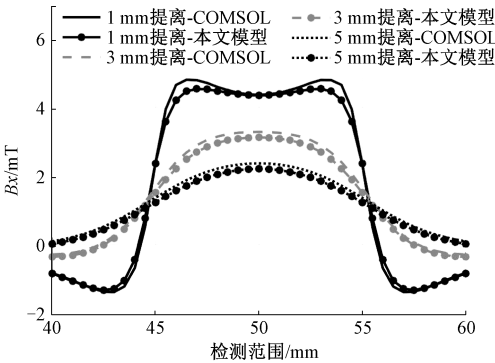


图 6 不同提离值时的漏磁信号比较

Fig. 6 Comparison of magnetic flux leakage signals at different lift off values

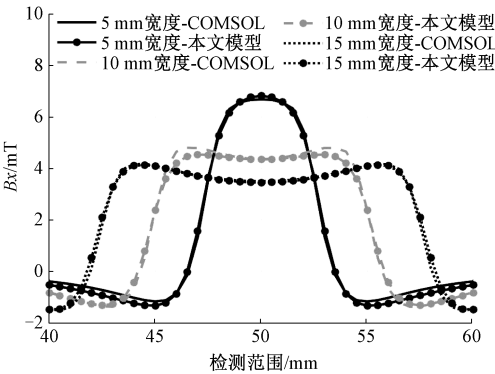


图 7 不同宽度时的漏磁信号比较

Fig. 7 Comparison of magnetic flux leakage signals at different widths

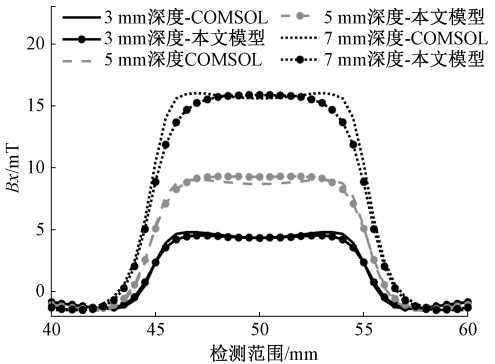


图 8 不同深度时的漏磁信号比较

Fig. 8 Comparison of magnetic flux leakage signals at different depths

着提离值、缺陷宽度、缺陷深度的变化而变化,且变化规律与 COMSOL 的漏磁信号相同。即提离值越高,轴向分量的峰值越小,曲线趋越近于直线;缺陷宽度越宽,轴向分量的峰值间距越大,峰值越小;缺陷深度越深,轴向分量的峰值越大,峰值和谷值位置几乎不变。进一步验证了本文模型的有效性。

对于三维缺陷,其漏磁检测实质上就是通过传感器阵列获取缺陷上方一定距离的漏磁信号。每个传感器都是单独工作的,因此一个三维缺陷的漏磁信号可以看作多个二维信号组合而成。对于如图 9 所示的三维不规则缺陷,以漏磁信号的轴向分量为例,本文模型和 COMSOL 计算结果如图 10 所示。从图 10 可以看出,本文模型可以实现不同的三维不规则缺陷的漏磁信号计算,且信号的拟合度较高。

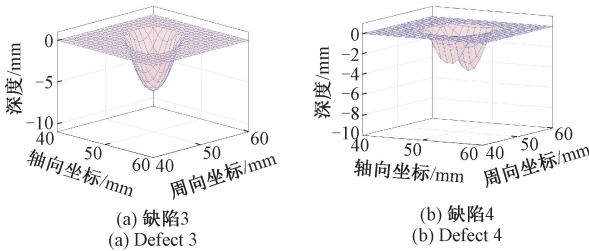


图 9 缺陷 3 和缺陷 4 实际轮廓

Fig. 9 Realistic contours of defect 3 and 4

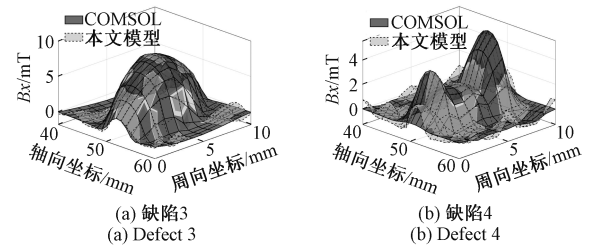


图 10 缺陷 3 和缺陷 4 的漏磁轴向分量

Fig. 10 Axial components of MFL signals of defect 3 and 4

从图 6~8 可以看出,本文模型计算的漏磁信号的随

为进一步验证本文所提前向模型在实际应用中的可行性,使用了漏磁检测实验数据集<sup>[27]</sup>。缺陷为 S355 钢材试件上深度分别为 2、4、6 和 8 mm 的狭长裂缝。装置如图 11 所示,磁化器对试件饱和磁化,传感器检测电压信号,数字编码器传输电压信号,电压信号与漏磁信号的各个分量呈正比,由此可得到缺陷的实测漏磁信号。

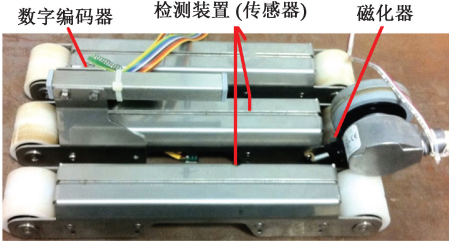


图 11 漏磁检测装置

Fig. 11 Magnetic leakage detection device

以 2、6 mm 裂缝为例,裂缝轮廓如图 12 所示,漏磁信号的轴向分量如图 13 所示。从图 13 中可以看出,预测信号与实测信号的拟合度高,说明了本文模型在实际应用中可行。

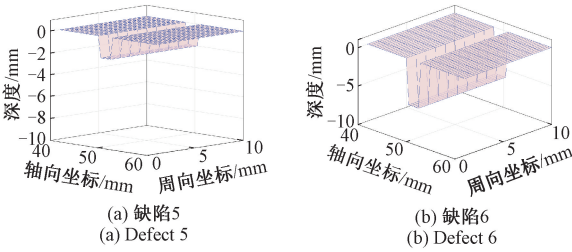


图 12 缺陷 5 和缺陷 6 实际轮廓

Fig. 12 Realistic contours contour of defect 5 and 6

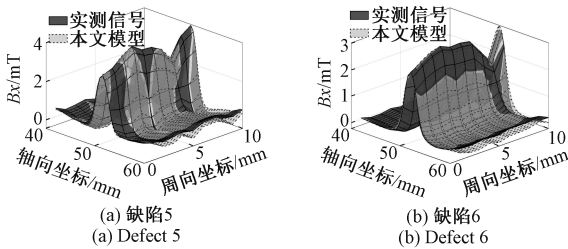


图 13 缺陷 5 和缺陷 6 漏磁轴向分量

Fig. 13 Axial components of MFL signals for defect 5 and 6

### 3.2 重构算法验证

为了验证所提改进算法的性能,按照式(18)计算真实缺陷深度和重构缺陷深度之间的均方误差( $E_R$ ),用于评价重构结果的准确性。

$$E_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q (\hat{X}_{ij} - X_{ij})^2}{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q (\hat{X}_{ij})^2}} \quad (18)$$

式中: $P$ 、 $Q$  分别表示深度矩阵的行数和列数, $\hat{X}$  为重构缺陷的深度矩阵, $X$  为真实缺陷的深度矩阵。

考虑到在实际应用中,由于短板效应,缺陷的最大深度直接影响到设备的安全性和使用寿命,检修人员通常根据缺陷的最大深度来采取维修措施,因此,重构缺陷最大深度与真实缺陷最大深度之间的误差可以作为评价重建精度的重要性能指标,定义最大深度误差  $E_{MD}$  为:

$$E_{MD} = \frac{|\max(\hat{X}) - \max(X)|}{h} \quad (19)$$

实验均在 Intel I5-12500H 中央处理器和 16 GB 内存的笔记本电脑, MATLAB R2021b 中实现。所有算法的缺陷轮廓初始值均为 50%  $h$ 。

为验证本文所提方法的有效性,使用 COMSOL 有限元仿真软件建立缺陷模型,将仿真结果作为仿真缺陷的实测漏磁信号。首先对于二维不规则缺陷(缺陷 1 和 2),使用本文算法和 Levenberg-Marquardt 算法(简称 LM 法)进行重构,结果如图 14 所示。

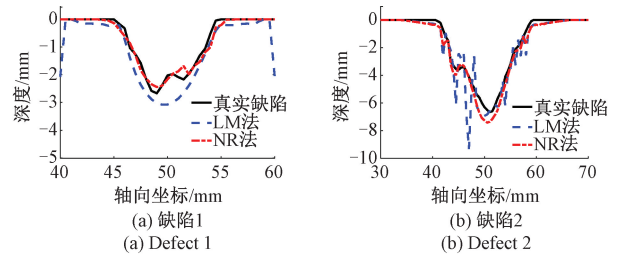


图 14 缺陷 1 缺陷 2 重构结果

Fig. 14 Reconstruction results of defect 1 and 2

从图 14 中可以看出,与 LM 法相比较,本文算法的重构结果更接近真实缺陷,重构精度更高。两种算法的目标函数值随迭代次数的变化曲线如图 15 所示。从图 15 中可以看出,LM 法收敛慢,寻优能力差,NR 法在迭代 50 次左右时收敛,有较好的寻优能力。

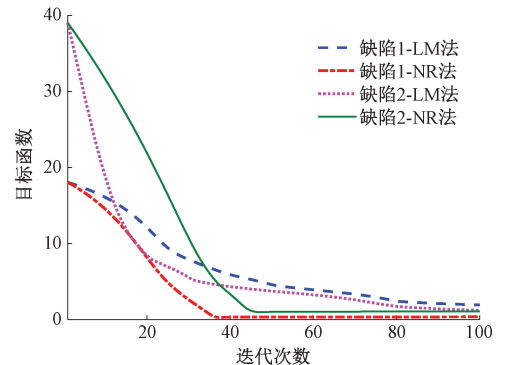


图 15 目标函数迭代曲线

Fig. 15 Iteration curve of objective function

对于三维缺陷重构,可转化为多个二维缺陷重构。将 NR 法用于三维不规则仿真缺陷重构(缺陷 3 和 4),并与 LM 法比较,结果如图 16 和 17 所示。从图 16 和 17 中可以看出,对于三维不规则仿真缺陷,NR 重构算法有良好的重构效果,且精度较高。

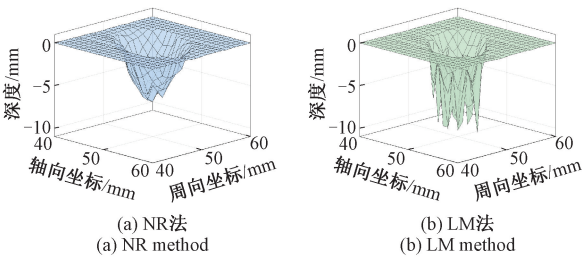


图 16 缺陷 3 重构结果  
Fig. 16 Reconstruction results of defect 3

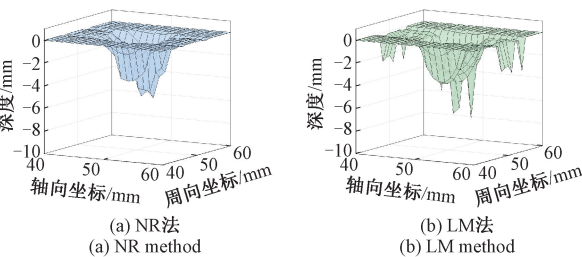


图 17 缺陷 4 重构结果  
Fig. 17 Reconstruction results of defect 4

为进一步验证本文重构算法的有效性,将其应用于三维真实缺陷(缺陷 5 和 6),并与 LM 法进行比较,重构结果如图 18 和 19 所示。从图 18 和 19 中可以看出,对于同一个三维真实缺陷,本文算法的重构轮廓更接近真实轮廓。

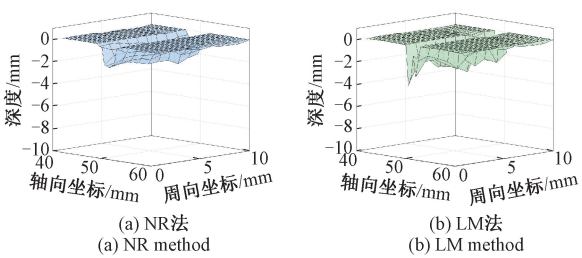


图 18 缺陷 5 重构结果  
Fig. 18 Reconstruction results of defect 5

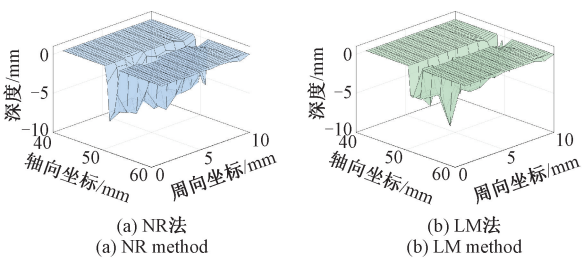


图 19 缺陷 6 重构结果  
Fig. 19 Reconstruction results of defect 6

在相同初值条件下,本文 6 个缺陷的重构结果性能的比较如表 2 所示,对于三维缺陷,表 2 中用时表示整个三维缺陷重构所需时间。从表 2 中可以看出,相同前向模型、初始条件的情况下,重构精度 NR 法比 LM 法高,均方误差和最大深度误差都比 LM 法小,通过计算本文 6 个缺陷 LM 法和 NR 法重构误差和最大深度误差的平均相对误差,得出:和 LM 法相比,NR 法的重构误差平均减少了约 41%,最大深度误差平均减少了 62%,且两个算法的计算时间相差不大。因此,本文所提算法可以快速准确地实现缺陷重构。

表 2 重构算法性能比较  
Table 2 Performance comparison of reconstruction algorithms

| 误差       | 重构算法 | 缺陷 1           | 缺陷 2           | 缺陷 3           | 缺陷 4           | 缺陷 5           | 缺陷 6           |
|----------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $E_R$    | LM 法 | 0.273 7        | 0.289 5        | 0.242 3        | 0.360 6        | 0.103 8        | 0.574 1        |
|          | NR 法 | <b>0.018 9</b> | <b>0.276 9</b> | <b>0.227 2</b> | <b>0.137 8</b> | <b>0.102 6</b> | <b>0.103 8</b> |
| $E_{MD}$ | LM 法 | 0.041 3        | 0.267 1        | 0.389 0        | 0.307 3        | 0.169 7        | 0.252 7        |
|          | NR 法 | <b>0.023 3</b> | <b>0.076 6</b> | <b>0.058 2</b> | <b>0.138 3</b> | <b>0.052 4</b> | <b>0.132 3</b> |
| 用时/s     | LM 法 | 0.249 8        | 1.481 3        | 0.529 1        | 0.505 6        | 2.751 7        | 2.361 2        |
|          | NR 法 | 0.214 7        | 1.529 2        | 0.536 3        | 0.535 3        | 2.189 6        | 2.113 9        |

4 结 论

本文为提高三维不规则缺陷漏磁重构的精度,首先利用传感器采样特性,将三维缺陷重构问题转化为二维

缺陷重构问题。然后对磁偶极子前向模型进行改进,提出了可以计算二维不规则缺陷的坐标偏移磁偶极子前向模型。相较于有限元模型、COMSOL 仿真软件,该模型计算时间短,且精度比有限元模型高。其次,以漏磁信号轴向分量为例,研究了不同宽度、深度和提离值条件下,该

模型计算的漏磁信号的变化规律,并和 COMSOL 的计算结果对比,进一步验证了本文前向模型的有效性。对于重构算法,提出改进的牛顿-拉夫逊法,通过改进阻尼因子提高修正量的精确度,进而提高缺陷重构精度。通过对不同三维不规则缺陷的仿真和实验结果表明,本文算法能有效重构出缺陷轮廓。相比于 Levenberg-Marquardt 重构算法,本文算法有更高的重构精度,可以实现快速重构,具有较强的灵活性。

## 参考文献

- [1] 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.  
GEN 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.
- [2] ZHANG D L, ZHANG EN CH, PAN SH 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: 6004411.
- [3] OU ZH 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): 6201607.
- [4] 马勇,那红宇,常建华,等. 基于漏磁检测的海上风力发电机短路故障诊断技术[J]. 船舶工程, 2023, 45(S1): 12-14.  
MA Y, NA H Y, CHANG J H, et al. Short-circuit fault diagnosis technology of offshore wind turbine based on magnetic flux leakage detection[J]. Shipengineering, 2023, 45(S1): 12-14.
- [5] AZIZZADEH T, SAFIZADEH M S. Estimation of the diameters, depths and separation distances of the closely-spaced pitting defects using combination of three axial MFL components[J]. Measurement, 2019, 138: 341-349.
- [6] 韩文花,原野,张玉祥. 任意形状缺陷漏磁检测的有限元前向模型[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(1): 80-84.  
HAN W H, YUAN Y, ZHANG Y X. Research on finite element forward model for magnetic flux leakage testing of arbitrary shape defects[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(1): 80-84.
- [7] 刘真伟,韩文花,杨婷. 一种快速计算二维缺陷漏磁场的有限元建模和求解方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 192-202.  
LIU ZH W, HAN W H, YANG T. A fast finite element modeling and solving method for 2D defect magnetic leakage field[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 192-202.
- [8] PIAO G Y, LI J Y, UDPA L, et al. The effect of motion-induced eddy currents on three-axis MFL signals for high-speed rail inspection[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(4): 6200211.
- [9] 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): 6201010.
- [10] 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, CHEN 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.
- [11] 熊毅,刘帅,黄鹏,等. 含缺陷管道磁化状态与漏磁信号规律研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(12): 187-192.  
XIONG Y, LIU SH, HUANG P, et al. The influence of excitation intensity on pipeline magnetic flux leakage detection[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(12): 187-192.
- [12] 杨理践,赵东升,耿浩,等. 漏磁信号增强算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 176-186.  
YANG L J, ZHAO D SH, GENG H, et al. Research on the MFL signal enhancement algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 176-186.
- [13] 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.
- [14] LIU B, LIANG Y, HE L, et al. Quantitative study on the propagation characteristics of MFL signals of outer surface defects in long-distance oil and gas pipelines[J]. NDT & E International, 2023, 137: 102861.
- [15] 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.
- [16] FEI SH G, LIU G H, FEI J Y, et al. Defect reconstruction of magnetic flux leakage measurements based on single dimension PSO algorithm[J]. Journal of Physics, 2021, 1948(1): 012008.
- [17] ZHANG D Q, HUANG CH, FEI J Y, et al. Defect reconstruction from magnetic flux leakage measurements employing modified cuckoo search algorithm [J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2021, 18(2): 1898-1925.
- [18] JOHN A F, BAI L B, CHENG Y H, et al. A heuristic algorithm for the reconstruction and extraction of defect shape features in magnetic flux leakage testing[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(11): 9062-9071.
- [19] WU Z N, WANG L X, WANG J F. A fast algorithm for 3D reconstruction of complex defect profiles for magnetic flux leakage inspection [J]. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2018, 60(6): 317-325.
- [20] JIANG L, ZHANG H G, LIU J, et al. Pipeline irregular defect inversion for magnetic flux leakage detection system based on heterogeneous multiclass feature fusion[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-9.
- [21] WU ZH M, 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: 2506010.
- [22] ZHANG SH X, LU S X, DONG X. Stress and corrosion defect identification in weak magnetic leakage signals using multi-graph splitting and fusion graph convolution networks[J]. Machines, 2023, 11(1): 11010070.
- [23] 曹辉, 杨理践, 刘俊甫, 等. 基于数据融合的小波变换漏磁异常边缘检测[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 71-79.
- CAO H, YANG L J, LIU J F, et al. Magnetic flux leakage anomaly edge detection based on data fusion and wavelet transformation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12): 71-79.
- [24] 李岩松, 王麒翔, 王敏壕, 等. 漏磁检测的混合正则化反演方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(21): 9-17.
- LI Y S, WANG Q X, WANG M H, et al. Research on hybrid regularization inversion method for magnetic flux leakage detection [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(21): 9-17.
- [25] 缪立恒, 潘峰, 彭丽莎, 等. 基于漏磁信号深度特性的缺陷深度轮廓迭代优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 3077-3086.
- MU L H, PAN F, PENG L SH, et al. Iterative optimization method of defect depth profile based on depth characteristics of MFL signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 3077-3086.
- [26] JIANG L, ZHANG H G, LIU J H, et al. A multisensor cycle-supervised convolutional neural network for anomaly detection on magnetic flux leakage signals [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(11): 7619-7627.
- [27] USAREK Z, CHMIELEWSKI M, PIOTROWSKI L. Reduction of the velocity impact on the magnetic flux leakage signal[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2019, 38(1): 28.

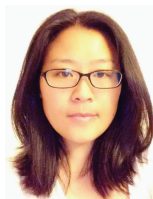
## 作者简介



王雨菲, 2021 年于上海电力大学获得学士学位, 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: wangyufei980330@163.com

**Wang Yufei** received her B.Sc. degree from Shanghai University of Electric Power in 2021. She is currently a master student at Shanghai University of Electric Power. Her 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.