

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312068

复杂裂纹涡流检测与评估方法研究*

靳建辉¹, 张卿¹, 韩博¹, 杨世品¹, 任毅²

(1. 南京工业大学电气工程与控制科学学院 南京 211816; 2. 江苏省特种设备安全监督检验研究院 南京 210009)

摘要: 钢轨表面及上表面产生的滚动接触疲劳裂纹通常以斜裂纹或多角度复杂裂纹的形态存在, 对其检测和评估是个难题。基于此, 采用基于无线能量传输的涡流检测方法(WPT-ECT), 设计新的探头结构并结合神经网络算法对裂纹进行检测和评估。首先, 有别于现有WPT-ECT方法, 采用增大激励频率, 而非串并联电容的方式, 构造谐振电路; 其次, 根据复杂裂纹的特点, 设计由两个八字形激励线圈和两个矩形接收线圈组成的方向性探头结构; 最后, 充分提取检测信号的特征, 并运用径向基神经网络算法对裂纹进行识别。仿真和实验结果表明, 所提出的探头结构对任何角度的缺陷均敏感。同时, RBF算法对斜裂纹、T裂纹、Y裂纹和1.2 mm 提高下的T裂纹的识别准确率分别为92.00%、95.27%、96.64%和89.50%。

关键词: 滚动接触疲劳裂纹; 无线能量传输; 涡流检测; 特征量提取; 径向基神经网络

中图分类号: TH878 TM154 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on eddy current testing and defect evaluation methods for complex cracks

Jin Jianhui¹, Zhang Qing¹, Han Bo¹, Yang Shipin¹, Ren Yi²

(1. College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;
2. Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China)

Abstract: The rolling contact fatigue cracks on the rail surface and upper surface usually exist in the form of inclined cracks or multi-angle complex cracks, which are difficult to detect and evaluate. Based on this, the wireless power transfer-eddy current testing (WPT-ECT) is adopted. A new probe structure is designed, and neural network algorithms are combined to detect and evaluate cracks. Firstly, different from the existing wireless power transfer-eddy current testing methods, the resonant circuit is constructed by increasing the excitation frequency instead of the series-parallel capacitance. Secondly, according to the characteristics of complex cracks, a directional probe structure consisting of two eight-figure excitation coils and two rectangular receiving coils is designed. Finally, the features of the detected signal are fully extracted, and the cracks are identified by the radial basis function neural network algorithm. Simulation and experimental results show that the proposed probe structure is sensitive to defects at any angle. Meanwhile, the recognition accuracy of the radial basis function algorithm for oblique crack, T crack, Y crack, and T crack with 1.2 mm lift-off is 92.00%, 95.27%, 96.64%, and 89.50%, respectively.

Keywords: rolling contact fatigue; wireless power transfer; eddy current testing; feature extraction; radial basis function neural network

0 引言

钢轨作为铁路运输的核心部件, 承受着很高的负荷, 再加上受到恶劣工作环境的影响, 极易产生滚动接触疲劳裂纹(rolling contact fatigue, RCF)伤损。RCF裂纹通常以斜裂纹或多角度复杂裂纹的形态分布在钢轨表

面及上表面, 当这些裂纹持续扩展并与相邻的裂纹融合在一起后, 会使钢轨产生剥离掉块, 进而可能导致钢轨横向断裂^[1-2]。因此, 对RCF裂纹进行定期检测, 对保障铁路的安全运行起着至关重要的作用。相比于其他无损检测技术, 涡流检测具有无需接触、效率高、速度快等优点^[3], 且对表面和上表面缺陷敏感, 因此, 可用于RCF裂纹检测。

收稿日期: 2023-10-25 Received Date: 2023-10-25

* 基金项目: 国家自然科学基金(61973334, 61903193)、江苏省市场监督管理局科技计划(KJ2022005, KJ2022002)项目资助

然而,目前应用于 RCF 裂纹检测中的大多数为常规涡流检测方法^[4],其采用单一频率的谐波作为激励,特征量有限,不利于复杂裂纹检测与评估。后有大量学者对涡流检测方法进行优化,并衍生出了如多频、扫频、脉冲涡流等很多其他的涡流检测方法^[5-6]。上述方法虽一定程度上提高了检测精度,但仍未解决特征量有限的问题。为解决这一问题,Daura 等^[7-8]提出了基于无线能量传输的涡流检测方法(wireless power transfer-eddy current testing, WPT-ECT)。有别于传统涡流检测方法,WPT-ECT 方法通过在激励和接收线圈处并联或串联电容组成谐振电路,并利用磁谐振的方式将能量从激励线圈通过试件传递给接收线圈。该技术应用 S 参数来表征试件缺陷。 S 参数通常为 M 形,其峰值对应的谐振频率、幅值等均含试件缺陷信息,因此与传统涡流信号相比,WPT-ECT 的信号特征更丰富。目前,Daura 等^[7-8]已经将该技术应用到铝试件裂纹的检测中,结果表明,WPT-ECT 技术可用于表面裂纹的检测和评估。

同时,为进一步提高裂纹检测精度,需对涡流探头和信号处理方法进行优化。关于涡流探头,国内外学者已经进行了大量的研究,尤其提出基于柔性印刷电路板(flexible printed circuit board, FPCB)的涡流探头结构^[9-13]。如 Zhang 等^[9]使用柔性阵列探头,实现了对弯曲表面及不规则表面缺陷的识别;Long 等^[10-11]设计了一款高精度柔性差分探头,其最小能够检测出宽 0.1 mm 的裂纹;许鹏等^[12]利用矩形柔性差分探头,实现了对钢轨密集裂纹的检测;杨冉等^[13]设计了一款柔性平面差分探头,实现了对一定深度下内部裂纹的检测。针对信号处理方法,主要包括时域和频域分析法^[14-15]。时域分析中,梁晓斌^[16]通过提取方差、标准差、峰峰值、峭度因子等时域特征,实现了对缺陷的精确测量;严俨等^[17]通过提取斜偏度特征,表征了 RCF 裂纹的长度和深度。频域分析中,赵志强^[18]通过提取重心频率、均方根频率、频率标准差等特征,发现重心频率可用于表征钢轨缺陷。此外,神经网络算法也在缺陷评估中得到了应用,Aber 等^[19]运用径向基神经网络(radial basis function, RBF)算法,将仿真数据输入网络,实现了对微小缺陷的表征。然而,上述绝大多数研究对象为单个斜裂纹,而针对复杂裂纹的研究较少。

基于此,本文拟针对复杂裂纹检测展开研究。考虑到 WPT-ECT 检测方法具有信号特征量丰富、传输效率高等优点,因此,本文拟采用此方法。同时,为简化探头结构,本文采用增加激励频率,而非串并联电容的方式,构造谐振电路。此外,基于复杂裂纹的特点,设计了一款柔性平面涡流探头,充分挖掘检测信号的特征,并结合神经网络算法进行缺陷分析与识别。

1 基于无线能量传输的涡流检测原理

在文献[8]中,田贵云等通过在激励和接收线圈处并联电容组成谐振电路,实现了对管道缺陷的检测。然而,由文献[20]可知,在高频激励下,线圈的容抗不能忽视,因此,可通过提高激励频率的方式组成谐振电路,简化电路结构。本论文所用激励频率为 20~30 MHz,属于高频激励。在此频率段下,涡流检测系统可等效为如图 1 所示的电路模型。其中,电阻 R_1 、电感 L_1 和电容 C_1 为激励线圈的等效电气参数; R_2 、 L_2 和 C_2 为接收线圈的等效电气参数;且等效电容并联在电阻和电感上,构成 P-P 拓扑结构。钢轨试件等效为电阻 R_s 和电感 L_s 。激励和接收线圈的电流分别用 I_1 和 I_2 表示;试件中的涡流等效为 I_s 。激励线圈、接收线圈和试件之间的互感用 M_{12} 、 M_{1s} 和 M_{2s} 表示; U_s 是激励电压源; r_s 和 R_L 分别为激励电路和接收电路的内阻。

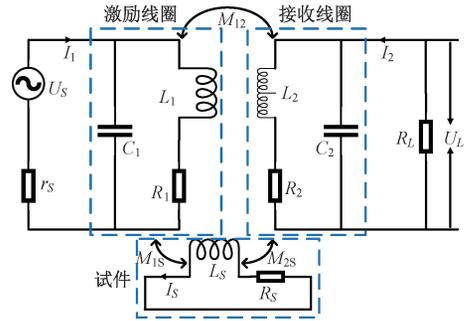


图1 涡流检测等效原理

Fig. 1 Equivalent schematic diagram of eddy current testing

由基尔霍夫电压定律,可推导 U_s 和 U_L 的表达式:

$$U_s = \left[r_s + (R_1 + j\omega L_1 + \Delta R_1 + j\omega \Delta L_1) // \frac{1}{j\omega C_1} \right] I_1 - j\omega M'_{12} I_2 \quad (1)$$

$$U_L = \left[(R_2 + j\omega L_2 + \Delta R_2 + j\omega \Delta L_2) // \frac{1}{j\omega C_2} \right] I_2 - j\omega M'_{12} I_1 \quad (2)$$

$$\Delta R_i = \frac{\omega^2 M_{is}^2 R_s}{R_s^2 + \omega^2 L_s^2} \quad (3)$$

$$\Delta L_i = - \frac{\omega^2 M_{is}^2 L_s}{R_s^2 + \omega^2 L_s^2} \quad (4)$$

$$M'_{12} = M_{12} - \frac{j\omega M_{1s} M_{2s}}{R_s + j\omega L_s} \quad (5)$$

其中, j 为虚数单位, ω 为激励信号角频率, ΔR_i 、 ΔL_i ($i = 1, 2$) 为试件中涡流导致的激励和接收线圈中的电阻和电感的变化, M'_{12} 为试件中涡流引起的激励和接收

线圈间互感的变化, ΔR_i 、 ΔL_i 和 M'_{12} 均与试件材料和缺陷有关。

在 WPT-ECT 检测方法中, 输出信号为散射系数 S_{21} 。由文献[8], 可得 S_{21} 的表达式, 将式(1)~(2)代入 S_{21} 表达式, 可得:

$$S_{21} = 2 \frac{[r_s + (R_1 + j\omega L_1 + \Delta R_1 + j\omega \Delta L_1)] I_1 - j\omega M'_{12} I_2}{[(R_2 + j\omega L_2 + \Delta R_2 + j\omega \Delta L_2)] I_2 - j\omega M'_{12} I_1} \sqrt{\frac{r_s}{R_L}} \quad (6)$$

此外, 由文献[21], 可得 P-P 拓扑结构激励和接收线圈的谐振频率, 为:

$$\omega_{Tx} = \sqrt{\frac{1}{(L_1 + \Delta L_1) C_1}} \quad (7)$$

$$\omega_{Rx} = \sqrt{\frac{1}{(L_2 + \Delta L_2) C_2}} \quad (8)$$

观察式(6)~(8)发现, 散射系数 S_{21} 与 ΔR_i 、 ΔL_i 、 M'_{12} 有关, 谐振频率 ω_{Tx} 、 ω_{Rx} 与 ΔL_i 有关。试件中的缺陷会引起 ΔR_i 、 ΔL_i 和 M'_{12} 等参数的变化, 因此散射系数 S_{21} 和谐振频率 ω_{Tx} 、 ω_{Rx} 可用于表征试件中的缺陷。

2 涡流探头设计

2.1 设计思路

由第1章分析可知, 为提高检测信号 S_{21} 对缺陷的灵敏度, 需增加试件中由涡流引起电阻 ΔR_i 和电感 ΔL_i 的扰动, 则需设计探头结构。涡流探头一般由激励线圈和接收线圈组成, 对于激励线圈, 考虑到本论文研究的对象为复杂裂纹, 其方向不确定, 因此, 需要能够在试件中产生方向性涡流的线圈结构。如图2(a)为本文设计的探头结构, 其中激励线圈由2个叠加的八字形线圈组成, 且2个八字形线圈分别放置在竖直方向和水平方向, 两线圈重叠部分为探头的检测区域, 如图中矩形虚线所示。在八字形线圈中通入激励电流, 根据平行四边形法则, 竖直放置的八字形线圈在虚线区域会产生沿 X

轴负方向的电流; 水平放置的八字形线圈在虚线区域会产生沿 Y 轴负方向的电流; 则叠加后总的激励电流沿 45° 反方向。由楞次定律, 试件表面产生的感应涡流与线圈中的电流方向相反, 因此在虚线区域, 试件中产生的感应涡流沿 45° 方向。即, 该激励线圈能够在试件表面产生 45° 的方向性涡流。对于接收线圈, 为增加阻抗, 设计为2个矩形线圈串联, 且其分布在激励线圈两侧。此外, 考虑到 FPCB 线圈能够抑制提高噪声、优化耦合效率、提高检测精度^[22], 因此, 上述激励和接收线圈采用 FPCB 工艺制作。

2.2 仿真分析

为证明所设计激励线圈在对不同角度裂纹检测时的性能优于经典激励线圈(本文指矩形激励线圈), 利用 COMSOL 软件建立了八字形激励线圈和矩形激励线圈的仿真模型, 两线圈的尺寸和放置方式均相同。仿真的具体参数如表1所示。其中, 八字形激励线圈的仿真模型如图2(b)所示。

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数名称	电导率 /($S \cdot m^{-1}$)	相对磁 导率	匝数	尺寸 /mm	线直径 /mil	线间距 /mil
八字激励	/	/	30	45×25	4	10
矩形激励	/	/	30	45×25	4	10
接收线圈	/	/	34	50×20	4	3
试件	2×10^6	1 000	/	180×100×20	/	/
缺陷	/	/	/	15×0.8×3	/	/
空气区域	1	1	/	600×400×200	/	/

在激励线圈中通入大小为1 A、频率为20 MHz的激励电流, 得到如图3所示的无缺陷试件表面的涡流分布。由图可知, 八字形线圈和矩形线圈产生的涡流强度最大值分别为 2.36×10^7 A/m² 和 2.04×10^7 A/m², 即八字形线圈产生的涡流强度更大。同时, 观察试件中的涡流分布可知, 八字形线圈能产生方向性涡流且涡流分布更加集中。由此可推断, 八字形线圈的检测性能要优于传统矩形线圈的检测性能。此外, 为验证八字形线圈对裂纹的检测能力, 将两线圈分别放置在 0° 裂纹的正上方, 获取试件表面的涡流分布。再将 0° 缺陷试件表面的涡流分布和无缺陷试件表面的涡流分布做差分, 得到如图4所示的 0° 裂纹对涡流的扰动云图。由图可知, 使用八字形线圈和矩形线圈时, 裂纹的涡流扰动峰峰值(即最大值和最小值的差)分别为 3.94×10^7 、 2.87×10^7 A/m²。用裂纹对涡流扰动的峰峰值评价线圈的检测灵敏度, 则可推断八字形线圈的检测灵敏度更高。综上所述, 与经典矩

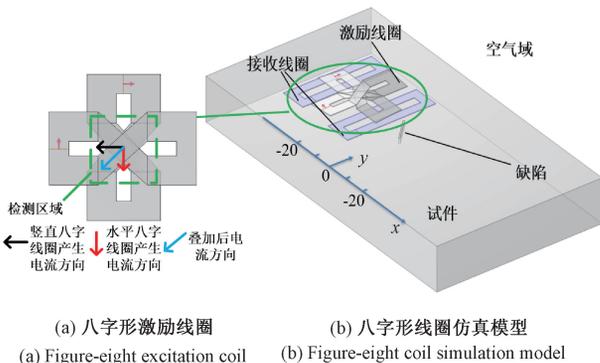
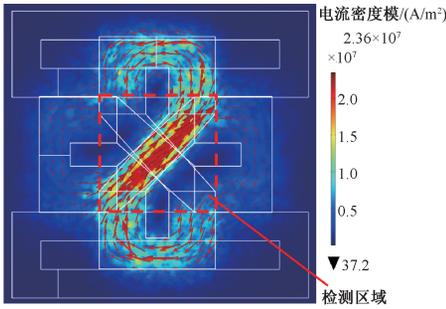


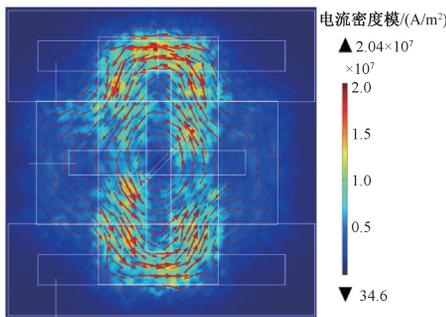
图2 仿真模型图

Fig. 2 Simulation model diagram

形线圈相比,八字形线圈能产生方向性涡流,涡流分布更集中,且产生的涡流强度更大,检测灵敏度更高。



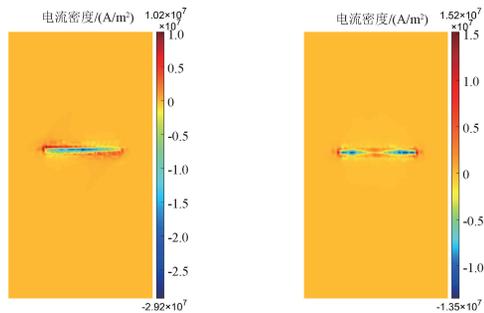
(a) 激励为八字形线圈
(a) The excitation is a figure-eight coil



(b) 激励为矩形线圈
(b) The excitation is a rectangular coil

图 3 试件表面涡流分布图

Fig. 3 Eddy current distribution on specimen surface



(a) 八字线圈0°涡流扰动
(a) Figure-eight coil 0° eddy current disturbance
(b) 矩形线圈0°涡流扰动
(b) Rectangular coil 0° eddy current disturbance

图 4 不同线圈 0°涡流扰动

Fig. 4 0° eddy current disturbance in different coils

进一步的,为验证该线圈对不同角度裂纹的检测能力,对 0°、30°、45°和 90° 4 个不同角度的裂纹进行仿真,得到不同角度裂纹对涡流扰动的云图。其中,0°裂纹的涡流扰动如图 4(a) 所示,30°、45°、90°裂纹的涡流扰动如图 5 所示。由图可知,0°、30°、45°和 90°裂纹对涡流扰动的峰峰值分别为 3.94×10^7 、 4.42×10^7 、 3.52×10^7 、 3.51×10^7 A/m²,即,不同角度裂纹对涡流的

扰动值差异不大。由此可知,该探头对任意角度的裂纹都敏感。

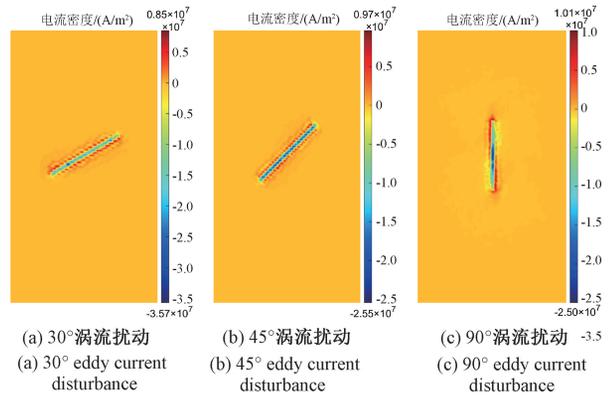


图 5 不同角度涡流扰动

Fig. 5 Eddy currents at different angles

3 实验平台搭建

为进一步研究探头性能,搭建了如图 6 所示的实验平台。实验平台由涡流探头、矢量网络分析仪、计算机、三维扫查台等组成。探头中的激励和接收线圈参数与仿真参数一致;矢量网络分析仪可用于产生激励信号并对散射系数 S_{21} 进行测量与存储;三维扫查台用于固定探头并使探头沿着试件表面进行扫查。同时,为体现探头对复杂裂纹的检测能力,设计了如图 7 所示的两块试件,试件材料均为 45 号钢,厚度均为 10 mm。试件 1 上有 0°、30°和 45°的 3 条斜裂纹,不同斜裂纹的尺寸均为长 15 mm、宽 0.8 mm、深度 3 mm。试件 2 上有不同角度斜裂纹复合而成的 T 字形和 Y 字形复杂裂纹。其中,T 裂纹由长 20 mm、宽 0.8 mm、深 3 mm 的两条垂直斜裂纹复合而成;Y 裂纹由长 15 mm、宽 0.8 mm、深 3 mm,两两夹角 120°的 3 条斜裂纹复合而成。

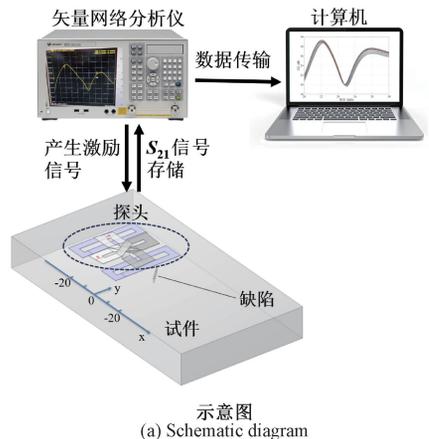


示意图
(a) Schematic diagram

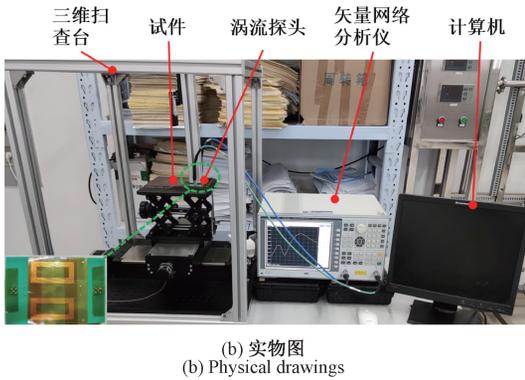


图6 实验平台示意图与实物图

Fig. 6 Schematic diagram and physical diagram of experimental platform

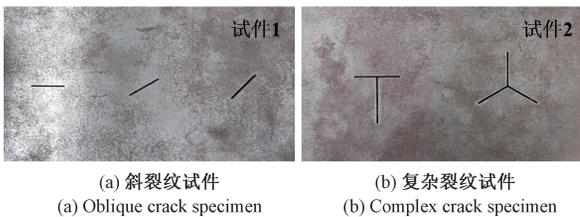


图7 斜裂纹和复杂裂纹试件

Fig. 7 Specimens with oblique cracks and complex cracks

实验所用激励频率范围为 20 ~ 30 MHz, 探头从 -20 mm 处以 0.5 mm 的步长定向扫描至 20 mm 处, 当探头扫描至 0 mm 处时, 裂纹恰好位于探头正下方。扫描共得到 80 组 S_{21} 的数据, 图 8 为扫描至部分位置时的 S_{21} 波形图。观察发现, 检测信号为 M 形, 其波形包含第一谐振峰和第二谐振峰, 且随扫描位置发生变化, 而扫描位置与缺陷有关, 因此信号的变化与缺陷有关。

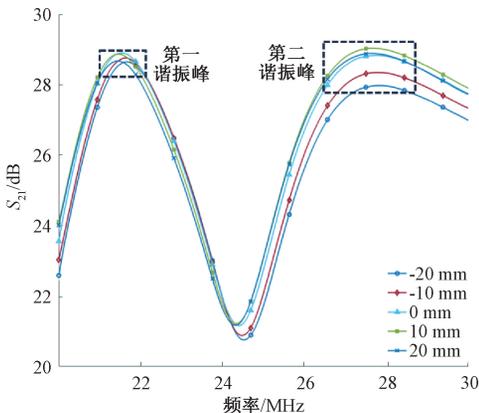


图8 检测信号

Fig. 8 Detection signals

4 缺陷识别

4.1 缺陷特征分析

由图 8 可知, 探头扫描至试件表面不同位置时 S_{21} 波形会发生一定变化, 再结合式 (6) ~ (8), 散射系数 S_{21} 及谐振频率 ω_{Tx} 、 ω_{Rx} 的变化均与缺陷有关, 因此需提取相应的特征进一步分析。对不同角度裂纹的 M 波形检测信号, 提取了文献 [7] 中用到的第 1 个谐振峰的幅值和谐振频率、第 2 个谐振峰的幅值和谐振频率这 4 个特征, 结果如图 9 所示。观察特征量随扫描位置的变化关系发现, 第一谐振峰的幅值随着扫描位置呈现先增大后减小的趋势, 而其他 3 个特征值随扫描位置无明显变化规律。考虑到探头从起始位置扫描至裂纹正上方时, 裂纹对涡流产生的扰动逐渐增大; 而再继续扫描至终止位置时, 裂纹对涡流的扰动又逐渐减小。因此第一谐振峰值随扫描位置的变化关系符合涡流分布特点, 可用于进行缺陷评估。

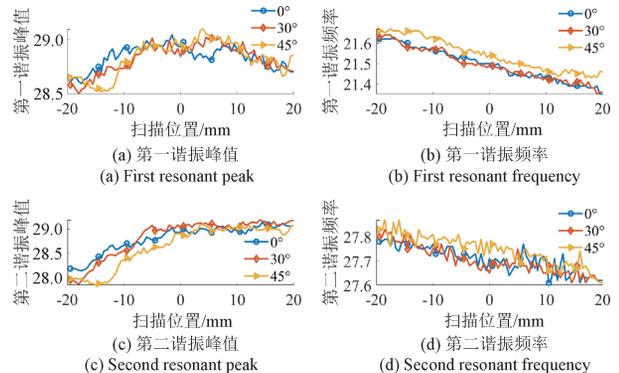


图9 斜裂纹峰值及频率随扫描位置变化关系

Fig. 9 Relationship between peak value and frequency of oblique crack and scanning position

然而, 由图 9(a) 可知, 由于噪声等因素影响, 第一谐振峰值的最大值并非出现在 0 点位置, 所以仅依靠第一谐振峰值来评估缺陷, 鲁棒性较差, 需引入其他特征量。本文拟采用平均值、整流平均、方差、标准差、均方根值、斜偏度、峰值因子、脉冲因子、裕度因子、峭度因子和波形因子这 11 个特征量。由于斜偏度、峰值因子、峭度因子等仅可针对单个峰值的数据进行分析, 同时考虑到第一谐振峰值对缺陷更敏感, 因此, 选取 S_{21} 波形中仅包含第一峰值特征的 20 ~ 24 MHz 的频率段进行分析, 提取这 11 个特征量后的结果如图 10 所示。观察这些特征量发现, 平均值、整流平均、均方根和峰值因子这 4 个特征量对裂纹较敏感。

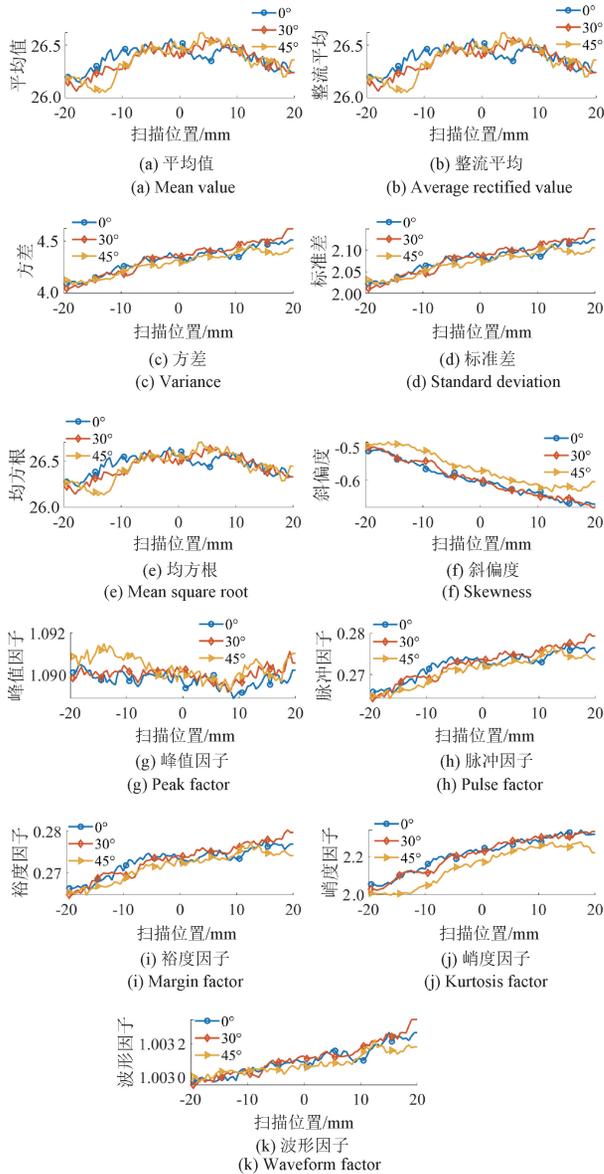


图 10 各特征量随扫描位置变化关系

Fig. 10 Relationship between each feature quantity and scanning position

4.2 结合 RBF 神经网络的缺陷识别方法

此外,为进一步提高缺陷识别精度,基于第一谐振峰值、平均值、整流平均、均方根值和峰值因子这 5 个对裂纹敏感的特征量,引入了神经网络算法。同时,考虑到涡流检测现场标定时的数据量一般较少,因此,选择了对小样本数据有较好预测性能的 RBF 算法^[23]。

RBF 神经网络是由输入层、隐层和输出层组成的 3 层神经网络,如图 11 所示。其中,输入层的 X 是 N 维向量, N 由数据所包含的特征量决定;隐层的核函数通常为高斯函数,包含 L 个神经元;输出层将隐层输出 $h_j(j = 1, 2, 3, \dots, L)$ 加权求和并输出最终预测结果,其中, ω_j 为

层输出 h_j 对应的权值。影响 RBF 神经网络性能的主要参数为隐层神经元个数 L ,高斯函数中心 c_j 和方差 σ 。对于神经元个数 L ,一般与训练样本数保持一致,如在对斜裂纹进行检测时,训练样本为 60,则神经元个数也为 60。对于径向基函数中心 c_j 和方差 σ ,根据数据维度较高的特点,选择用计算速度快的 K 均值聚类算法进行确定。当确定了 L 、 c_j 和 σ 后,网络的性能已基本确定,因此权值 ω_j 对预测精度产生的影响较小,此处使用最小二乘法来确定权值。

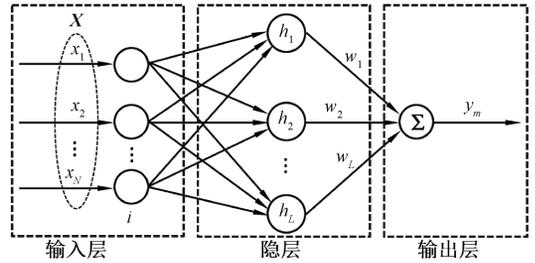


图 11 RBF 神经网络原理

Fig. 11 Schematic diagram of RBF neural network

如图 12 为探头检测过程示意图,其中,探头检测区域为图中所示矩形区域,用裂纹的移动代替探头移动,且 -20 、 -15 、 0 、 15 、 20 mm 处分别为缺陷在位置 1~5 时几何中心对应的横坐标。以 0.5 mm 步长对每个斜裂纹扫描,单个裂纹可获取 80 组数据。认为裂纹未进入检测区域(位置 1~2、位置 4~5)获得的检测数据为无缺陷数据,共 22 组;裂纹进入检测区域(位置 2~4)的为有缺陷数据,共 58 组。每组数据包含第一谐振峰值、平均值、整流平均、均方根值和峰值因子这 5 个特征量,因此输入层向量 X 的维度为 5。考虑到 0° 裂纹的标样最为常见,因此选择 0° 裂纹的数据为训练集。实验时,从训练集中随机选取 60 组数据进行训练,则隐层包含 60 个神经元。再将 30° 、 45° 和剩余 0° 裂纹数据混合作为测试集,并随机选取 40 组进行测试。第 1 次实验时的准确率如图 13 所示。由图可知,40 组测试样本中有 37 组识别正确,缺陷评估的准确率为 92.5%。此外,考虑到训练集和测试集

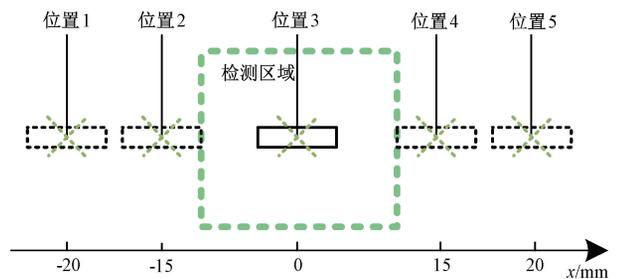


图 12 裂纹扫描过程

Fig. 12 Crack scanning process

的随机性,又做了 10 组实验并统计了每次实验的准确率,结果如表 2 所示。缺陷评估的准确率均值为 92.00%。结果表明,该 RBF 网络仅对一种裂纹的数据进行训练,即可实现对任意角度裂纹的识别。

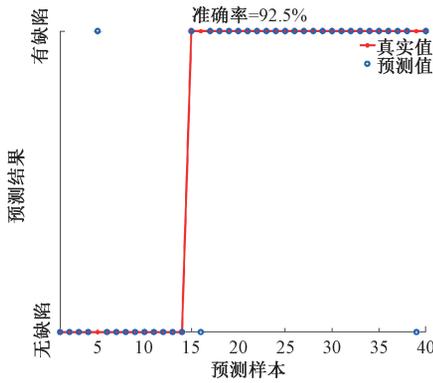


图 13 斜裂纹第 1 次缺陷评估准确率

Fig. 13 Accuracy rate of first defect evaluation of oblique crack

表 2 斜裂纹缺陷评估准确率

Table 2 Accuracy rate of oblique crack defect evaluation

实验序号	缺陷评估准确率/%
1	92.50
2	92.50
3	87.50
4	92.50
5	95.00
6	92.50
7	95.00
8	90.00
9	92.50
10	90.00
平均值	92.00

5 讨论

为进一步验证算法对复杂裂纹的识别能力,又对 T/Y 裂纹及不同提离下的检测信号进行了分析。

5.1 T/Y 裂纹

用 RBF 算法对 T/Y 复杂裂纹进行缺陷识别。对 T/Y 裂纹分别以 0.5 mm 步长进行扫描,两次扫描均可获得 80 数据。将上述 T/Y 裂纹的检测数据混合,以验证算法对不同复杂裂纹的识别能力。混合后共有 80×2=160 组数据,随机选取其中 120 组作为训练样本,40 组作为测试样本。第 1 次实验准确率如图 14 所示,重复 10 次

实验后,结果如表 3 所示。T 裂纹、Y 裂纹的准确率均值分别为 95.27%、96.64%,即该算法能很好的区分不同形态的复杂裂纹。

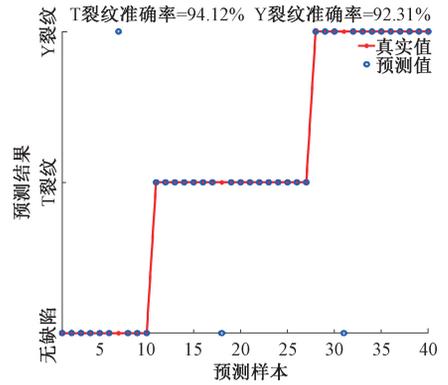


图 14 T/Y 裂纹第 1 次缺陷评估准确率

Fig. 14 Accuracy rate of first defect evaluation of T/Y crack

表 3 T/Y 裂纹缺陷评估准确率

Table 3 Accuracy rate of T/Y crack defect evaluation

实验序号	T 裂纹评估正确率/%	Y 裂纹评估正确率/%
1	94.12	92.31
2	91.67	93.75
3	100.00	100.00
4	92.31	92.86
5	93.75	100.00
6	93.75	100.00
7	100.00	93.75
8	93.33	100.00
9	93.75	100.00
10	100.00	93.75
平均值	95.27	96.64

5.2 不同提离

考虑到实际应用中,试件表面可能存在涂层或者不平整的情况,因此,研究了在一定提离下,该探头的检测能力。以 T 裂纹检测信号为例,说明 RBF 算法在不同提离下的能力。在 0、0.3、0.6、0.9、1.2 mm 提离时分别以 0.5 mm 步长对 T 裂纹进行扫描,每次扫描均可获得 80 组数据。对不同提离下的数据分别进行缺陷评估,将 60 组作为训练样本,20 组作为测试样本。图 15 为 1.2 mm 提离下,第 1 次实验的准确率。重复 10 次实验后,结果如表 4 所示。在 0、0.3、0.6、0.9、1.2 mm 提离时对 T 裂纹识别的准确率均值分别为 98.50%、97.50%、95.50%、91.00%、89.50%。但受提离效应的影响,对 T 裂纹的识别准确率随提离距离的增加而逐渐降低。

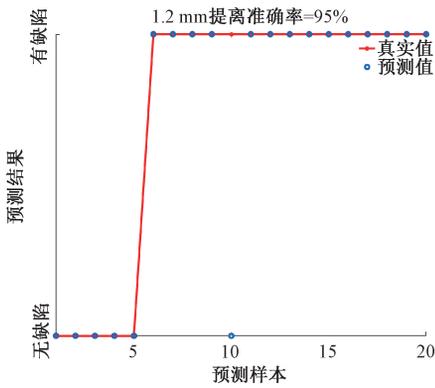


图 15 1.2 mm 提高第 1 次缺陷评估准确率

Fig. 15 Accuracy of the first defect evaluation of 1.2 mm lift-off

表 4 不同提高下 T 裂纹缺陷评估准确率

Table 4 Accuracy rate of T crack defect evaluation under different lift-off conditions

实验 序号	0.0 mm 提高/%	0.3 mm 提高/%	0.6 mm 提高/%	0.9 mm 提高/%	1.2 mm 提高/%
1	100.00	100.00	95.00	95.00	95.00
2	95.00	95.00	100.00	90.00	85.00
3	100.00	95.00	90.00	85.00	95.00
4	100.00	100.00	90.00	90.00	85.00
5	100.00	95.00	100.00	90.00	85.00
6	100.00	100.00	95.00	90.00	90.00
7	95.00	100.00	100.00	90.00	90.00
8	95.00	90.00	95.00	95.00	95.00
9	100.00	100.00	100.00	95.00	85.00
10	100.00	100.00	90.00	90.00	90.00
平均值	98.50	97.50	95.50	91.00	89.50

6 结 论

本文针对以斜裂纹或多角度复杂裂纹形态存在的 RCF 裂纹难以检测的问题,提出使用 WPT-ECT 检测方法,采用高频激励构造了谐振电路,并对探头结构和缺陷评估方法展开了研究。对于检测方法,与常规涡流检测方法相比,WPT-ECT 能够提高检测精度,且其检测信号为 S 参数,信号特征更加丰富。对于探头结构,提出由两个八字形线圈叠加而成的激励线圈和两个串联的矩形接收线圈组成的探头结构。叠加后的八字形线圈能产生方向性涡流,因此该探头对任意角度裂纹均敏感。对于信号处理方法,充分分析了检测信号中对缺陷敏感的 5 个特征量:第一谐振峰值、平均值、整流平均、均方根值和峰值因子,并结合 RBF 算法对斜裂纹、T/Y 复杂裂纹和不

同提高的检测信号进行分析。结果表明,对斜裂纹、T 裂纹、Y 裂纹和 1.2 mm 提高下缺陷识别的准确率均值分别为 92.00%、95.27%、96.64% 和 89.50%。本文研究内容可为钢轨 RCF 裂纹检测提供技术支持。

参考文献

[1] 田贵云,高斌,高运来,等. 铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述[J]. 仪器仪表学报,2016,37(8):1763-1780.
TIAN G Y, GAO B, GAO Y L, et al. Summary of inspection and monitoring technology for railway rail defects [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1763-1780.

[2] LIU Y, TIAN G Y, GAO B, et al. Depth quantification of rolling contact fatigue crack using skewness of eddy current pulsed thermography in stationary and scanning modes [J]. NDT & E International, 2022, 128: 102630.

[3] LI C, FAN M B, CAO B H, et al. Accurate thickness measurement using eddy current system based on novel transformer model [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-12.

[4] 陶功明,王仁福,朱华林,等. 钢轨表面质量自动检测技术的发展与应用[J]. 轧钢,2016,33(6):59-62.
TAO G M, WANG R F, ZHU H L, et al. Development and application of automatic detection technology for rail surface quality[J]. Steel Rolling, 2016, 33(6): 59-62.

[5] 张牧,刘珊,张荣华,等. 相轨迹电涡流无损检测方法及其频率响应特性研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(10):2267-2273.
ZHANG M, LIU SH, ZHANG R H, et al. Study on eddy current nondestructive testing method and frequency response characteristics in phase trajectory [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(10): 2267-2273.

[6] 武新军,张卿,沈功田. 脉冲涡流无损检测技术综述[J]. 仪器仪表学报,2016,37(8):1698-1712.
WU X J, ZHANG Q, SHEN G T. Overview of pulsed eddy current nondestructive testing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1698-1712.

[7] DAURA L U, TIAN G Y. Wireless power transfer based non-destructive evaluation of cracks in aluminum material[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19 (22): 10529-10536.

[8] DAURA L U, TIAN G Y, YI Q J, et al. Wireless power transfer-based eddy current non-destructive testing using a flexible printed coil array [J]. Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2020, 378(2182): 1-17.

- [9] ZHANG N, PENG L, HE Y Z, et al. Flexible probe with array tunneling magnetoresistance sensors for curved structure inspection [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-9.
- [10] LONG C, ZHANG N, TAO X C, et al. Resolution enhanced array ECT probe for small defects inspection[J]. Sensors, 2023, 23(4): 2070.
- [11] DONG H R, QI P, HAN J, et al. High-resolution magnetic imaging probe with staggered sensor arrays for small defects inspection [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(17): 19153-19162.
- [12] 许鹏,刘柏霖,陈亚雄.基于差分柔性涡流探头的铁轨裂纹检测方法[J].中国机械工程,2023,34(20):2419-2427.
XU P, LIU B L, CHEN Y X. Detection method of rail cracks based on differential flexible eddy current probe[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(20): 2419-2427.
- [13] 杨冉,翟国富,徐博,等.基于脉冲涡流技术的柔性平面差分探头设计[J].仪表技术与传感器,2022(10):1-5.
YANG R, ZHAI G F, XU B, et al. Design of flexible planar differential probe based on pulsed eddy current technology [J]. Instrument Technique and Sensor, 2022(10): 1-5.
- [14] 何赞泽.电磁无损检测缺陷识别与评估新方法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2014.
HE Y Z. Research on new method of defect identification and evaluation in electromagnetic nondestructive testing[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [15] 孙凤山,范孟豹,曹丙花,等.基于时频关键信息融合的热障涂层太赫兹准确测厚方法[J].机械工程学报,2023,59(14):10-22.
SUN F SH, FAN M B, CAO B H, et al. Accurate THz thickness measurement method of thermal barrier coating based on time-frequency key information fusion [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(14): 10-22.
- [16] 梁晓斌.天然气管道缺陷的智能诊断与风险评估方法研究[D].北京:中国石油大学,2020.
LIANG X B. Research on intelligent diagnosis and risk assessment method of natural gas pipeline defects [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2020.
- [17] 严严,刘怡,朱俊臻,等.基于电涡流脉冲热成像偏度特征的钢轨自然裂纹量化评估[J].机械工程学报,2021,57(18):75-85.
YAN Y, LIU Y, ZHU J ZH, et al. Quantitative evaluation of rail natural cracks based on the characteristics of eddy current pulse thermal imaging[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(18): 75-85.
- [18] 赵立强.基于列车振动信息的钢轨波磨状态检测与识别研究[D].北京:北京交通大学,2021.
ZHAO L Q. Research on detection and identification of rail wear condition based on train vibration information [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [19] ABER C, HAMID A, ELCHIKH M, et al. Eddy current microsensor and RBF neural networks for detection and characterization of small surface defects [J]. Measurement Science Review, 2022, 22(3): 112-121.
- [20] LIU J W, FRANCIS D. Characterizations of high frequency planar transformer with a novel comb-shaped shield [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 4493-4496.
- [21] 朱勇.电动汽车无线充电系统建模与电磁安全性研究[D].重庆:重庆大学,2017.
ZHU Y. Modeling and electromagnetic safety of wireless charging system for electric vehicles [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [22] LUO J X, YANG Z Y, LI S P, et al. FPCB surface defect detection: A decoupled two-stage object detection framework [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-11.
- [23] 何西旺,杨亮亮,冉仁杰,等.基于多评价标准的代理模型综合比较研究[J].机械工程学报,2022,58(16):403-419.
HE X W, YANG L L, RAN R J, et al. Comprehensive comparative study of agent models based on multiple evaluation criteria [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(16): 403-419.

作者简介



靳建辉,2023年于南京工业大学获得学士学位,现为南京工业大学硕士研究生,主要研究方向为电磁无损检测。

E-mail: jinjianhui@njtech.edu.cn

Jin Jianhui received his B. Sc. degree from Nanjing Tech University in 2023. He is currently a master student at Nanjing Tech University. His main research interest is electromagnetic nondestructive testing.



张卿(通信作者),2012年于华北电力大学获得学士学位,2018年于华中科技大学获得博士学位,现为南京工业大学副教授,主要研究方向为电磁无损检测。

E-mail: zhangqing@njtech.edu.cn

Zhang Qing (Corresponding author) received her B. Sc. degree from North China Electric Power University in 2012, and received her Ph. D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2018. She is currently an associate professor at Nanjing Tech University. Her main research interest is electromagnetic nondestructive testing.