

基于分级概率成像的大电机定子绝缘损伤识别*

李豪 李锐华 胡波 潘玲 郭其一
(同济大学电子与信息工程学院 上海 201804)

摘要: 为了正确评估大电机定子绝缘老化程度,提出了一种基于导波复合特征的分级概率成像损伤检测方法。通过提取损伤前后 Lamb 波信号之间的相关系数,利用全局概率成像初步获取绝缘损伤的分布区域和损伤程度。通过提取 Lamb 波散射信号波包传播时间和峰值特征,采用局部概率成像方法进一步表征损伤的局部特征。通过对两种损伤概率成像结果进行图像融合获得定子绝缘损伤识别结果。最后,对不同的典型绝缘损伤进行了损伤检测实验。结果表明:利用复合特征和分级概率成像方法可以识别出定子绝缘损伤位置和损伤程度,能够为大电机定子绝缘故障诊断提供更加有效的参考信息。

关键词: 大电机; 定子绝缘; 损伤检测; Lamb 波; 概率成像

中图分类号: TH89 TM307 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4037

Stator insulation damage identification in large generators based on a hierarchical probability imaging method

Li Hao, Li Ruihua, Hu Bo, Pan Ling, Guo Qiyi

(School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to correctly evaluate the aging degree of the stator insulation of large generator, a hierarchical probabilistic imaging damage detection algorithm based on the hybrid features of Lamb wave is proposed in this paper. The correlation coefficients between healthy and damaged Lamb wave signals are extracted and the global probability imaging is adopted to preliminarily estimate the region and degree of the insulation damage. The time of flight and peak value of the scattered Lamb wave packet are extracted and the local probability imaging is adopted to further determine the local feature of the damage. The image fusion of two damage probability imaging results is conducted, and the stator insulation damage identification result is obtained to aggregate and strengthen the damage features. Moreover, the damage detection experiments were conducted to detect different typical stator insulation damages. The results show that the proposed method is capable of identifying both the location and severity of the insulation damage, which can provide effective and valuable information for the fault diagnosis of large generator stator insulation.

Keywords: large generator; stator insulation; damage detection; lamb wave; probability-imaging

1 引言

定子绝缘状况在很大程度上决定了大型发电机的寿命及运行可靠^[1]。由于受到电、热、机械和环境因素的综合影响,定子绝缘老化机理十分复杂^[2]。对定子绝缘老化状态进行评估一直是电气绝缘诊断领域中的难题^[3]。研究表明,绝缘内部结构性损伤的形成与发展是定子绝缘性能劣化的主要原因^[4]。因此,及时、有效地检测并识

别出定子绝缘结构损伤,就能够为大电机绝缘状态诊断提供有效、可靠的参考信息。

目前,针对大电机定子绝缘老化状态评估主要围绕非破坏性参量而展开^[1-3]。这些非破坏性参量可以分为两类:一类是电气测量参量,如泄漏电流、绝缘电阻、吸收比、极化指数、局部放电和介质损耗参量等。其中,基于局部放电测试^[5]的特征参量被应用于定子绝缘状态评估,已发展成为大电机定子绝缘诊断的有效手段之一;另一类是非电气测量参量,其中,声学特性参量如:低频超

收稿日期:2014-12 Received Date: 2014-12

* 基金项目:国家自然科学基金(51177110)项目资助

声最小声速和平均声速^[6] 被用于评估定子绝缘老化状态。以上非破坏性参量可以宏观反映绝缘的老化状态, 但是它们对于绝缘损伤的微观本质缺乏进一步的分析和研究。现有的定子绝缘损伤检测方法还不能够对损伤进行定位与成像识别, 难以获得绝缘损伤的具体位置及损伤程度。

导波具有良好的传播特性, 其对结构中的微小损伤和初始损伤较为敏感, 近年来, 应用导波进行复合材料结构损伤检测引起了广泛研究^[7-9]。利用导波不仅能够检测出复合材料结构中损伤的存在, 而且可以对损伤进行定位^[10], 甚至进行成像^[11-13]。大电机定子绝缘结构本质上属于一种层压复合材料结构^[3]。因此利用导波可以对定子绝缘中的损伤进行检测。

为了能够有效检测出定子绝缘中的损伤位置及大小, 依据导波基本原理, 提出一种基于导波复合特征的分级概率成像方法对大电机定子绝缘中的损伤进行成像识别。最后通过实验验证了该方法的有效性。

2 基于导波的定子绝缘损伤检测原理

依据导波理论^[8], Lamb 波是一种在固体板状结构中传播的弹性导波, 其在传播过程中遇到损伤时会发生反射、透射、模式转换等现象, 从而引起 Lamb 波信号发生变化。通过解析 Lamb 波检测信号可以实现对定子绝缘结构的损伤检测和识别。基于导波的定子绝缘损伤检测原理如图 1 所示。其中 (a) 为由配置在定子绝缘表面的 PZT 压电片所组成的传感器网络。主要用于 Lamb 波的激励和接收。(b) 为定子绝缘损伤检测单元, 主要用于定子绝缘损伤成像识别。损伤特征提取是绝缘损伤检测中的关键环节。

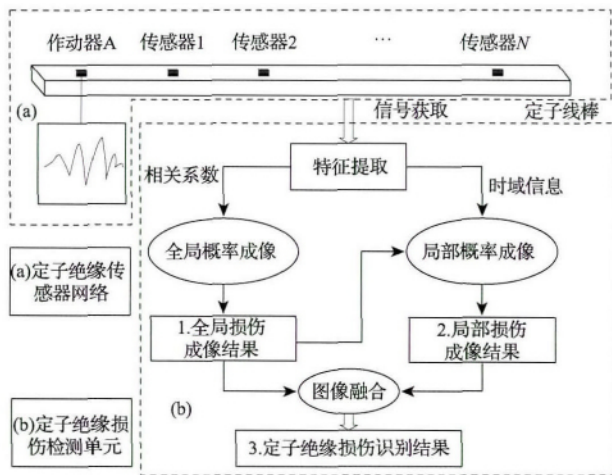


图 1 基于导波的定子绝缘损伤检测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the damage detection for stator insulation based on guided waves

从导波传播的角度, 导波在定子绝缘中的传播更复杂, 主要体现在两个方面: 首先, 绝缘材料上的各项异性和不均匀加剧了导波的频散, 从而加大了信号处理及特征提取的难度^[8]。其次, 定子线棒的边界条件使得目标导波更容易受到边界反射波的干扰。考虑到定子绝缘的结构特点^[3], 利用单一损伤特征难以准确表征绝缘损伤的状况。主要通过提取多种能够有效表征绝缘损伤状况的特征量, 提出一种分级概率成像方法对定子绝缘损伤进行成像识别。首先, 通过提取损伤前后 Lamb 波信号之间的相关系数^[14], 利用全局概率成像初步获取绝缘损伤的分布区域和损伤程度。其次, 通过提取 Lamb 波散射信号波包传播时间和峰值特征^[12], 采用局部概率成像方法进一步进行损伤成像, 最后对以上两种损伤概率成像图像融合, 获得定子绝缘损伤识别结果。

3 分级概率成像方法

3.1 全局概率成像

全局概率成像方法通过提取定子绝缘损伤前后 Lamb 波信号之间的相关系数作为损伤特征, 初步获取定子绝缘结构中的损伤信息。依据 Lamb 波理论, 当传播路径中存在损伤时, Lamb 波信号与其无损时相比会发生变化, 并且损伤程度越大, 信号变化越大。相关系数可以定量评价损伤前后信号的差异程度^[14], 并依此评价定子绝缘健康状况。考虑一对激励-接收路径, 分别采集无损时的 Lamb 波信号 $H = \{H_1, H_2, \dots, H_n\}$ 和有损时的 Lamb 波信号 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$, 它们的相关系数 $\rho_{H,D}$ 定义如下^[14]:

$$\rho_{H,D} = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \mu_H) (D_i - \mu_D)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_i - \mu_H)^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (D_i - \mu_D)^2}} \quad (1)$$

式中: μ_H 和 μ_D 分别为 H 和 D 的平均值。当损伤程度越大, 或损伤距离该传播路径越近, H 与 D 之间越不相关, 即 $\rho_{H,D}$ 的值也越小。依此, 建立定子绝缘结构空间中损伤存在的概率分布模型^[14]:

$$P(x, y) = \sum_{k=1}^N (1 - \rho_k) \cdot \left[\frac{\beta - R(x, y)}{\beta - 1} \right] \quad (2)$$

式中:

$$R(x, y) = \begin{cases} R_k(x, y), & R_k(x, y) < \beta \\ \beta, & R_k(x, y) \geq \beta \end{cases} \quad (3)$$

$$R_k(x, y) = \frac{D_{ak} + D_{sk}}{D_k} \quad (4)$$

式中: $P(x, y)$ 为位置 (x, y) 处的损伤存在概率, N 为定子绝缘中的导波激励-接收路径数目, ρ_k 为第 k 条路径下的相关系数, $R_k(x, y)$ 为位置 (x, y) 距离导波传播路径的相

对距离; D_k 为作动器到传感器的距离 D_{ak} 和 D_{sk} 分别表示位置 (x, y) 距离作动器和传感器的距离, β 为大于 1 的尺寸标量, 其控制着损伤敏感区域大小^[14]。

由式 (2) 可知, 当相关系数 ρ_k 越小 (损伤越严重) 或者相对距离 $R_k(x, y)$ 越小 $P(x, y)$ 的值越大, 该位置的损伤存在概率越大。将式 (2) 所计算的损伤存在概率与图像灰度值相对应, 可以得到定子绝缘损伤图像。

3.2 局部概率成像

根据惠更斯原理, 损伤散射 Lamb 波携带着丰富的损伤信息。其中, 损伤散射信号传播时间 (TOF) 能够有效表征损伤位置信息^[8,12], 利用 TOF 进行损伤定位的原理如图 2 所示。

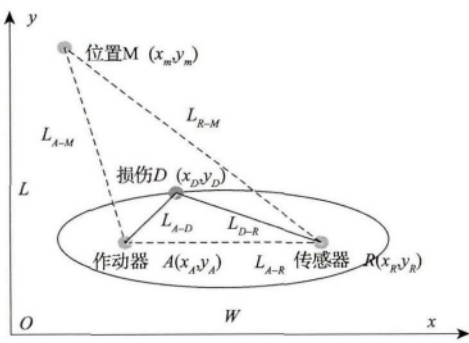


图 2 基于 TOF 的损伤定位示意图

Fig. 2 The principle of damage localization base on TOF

考虑一对激励-接收路径, 由作动器 $A(x_A, y_A)$ 激励出的 Lamb 波经损伤 $D(x_D, y_D)$ 后, 传感器 $R(x_R, y_R)$ 接收的损伤散射信号传播时间为:

$$T_{A-D-R} = (L_{A-D} + L_{D-R}) / V_g \quad (5)$$

式中: L_{A-D} 为作动器 A 到损伤 D 的距离, L_{D-R} 为损伤到接收传感器 R 之间的距离, V_g 为 Lamb 波在定子绝缘中的群速度。

当 T_{A-D-R} 确定后, 便可以获得一个以 A 和 R 为焦点的损伤可能存在的位置椭圆轨迹^[12]。当空间位置离该轨迹越近, 该位置存在损伤的概率越大。为了量化任意空间位置 $M(x_m, y_m)$ 存在损伤的概率, 引入概率积分函数^[12]:

$$F(T_{ij}) = \int_{-\infty}^{T_{ij}} f(T_{ij}) dT_{ij} \quad (6)$$

式中: $f(T_{ij}) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{T_{ij}^2}{2\sigma^2})$ 为概率密度函数, T_{ij}

表示 Lamb 波位置 M 传播到作动器 A 和传感器 R 的时间 $T_M = (L_{A-M} + L_{R-M}) / V_g$ 与 T_{A-D-R} 的时间延迟。利用散射信号波包幅值作, 对均方差 σ 进行选择:

$$\sigma = w \frac{A_{scatter}}{A_{health}} \quad (7)$$

式中: w 为权重系数, $A_{scatter}$ 为损伤散射波包峰值, A_{health} 为无损时接收的 Lamb 波波包峰值。根据高斯分布的性质,

对于某一特定的 T_{ij} 和 σ , 该位置损伤存在的概率定义为:

$$P(T_{ij}) = 1 - |F(T_{ij}) - F(-T_{ij})| \quad (8)$$

根据式 (8) 计算定子绝缘所有空间位置的损伤存在概率与图像灰度值的对应关系, 得到定子绝缘损伤图像。

3.3 图像融合方法

单一路径所包含的损伤信息十分有限, 无法充分和准确地表征损伤状况, 并且容易受到噪声等因素的干扰^[15]。为此, 采用图像融合方法提高损伤信息信噪比^[16-17], 以增强损伤成像质量。

对于定子绝缘线棒中的 N 条激励-接收路径, 对全局概率成像结果 $P_1(i)$ 进行几何融合, 融合结果 P_1 为:

$$P_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_1(i) \quad (9)$$

对局部概率成像结果 $P_2(i)$ 进行算术融合, 融合结果 P_2 如下:

$$P_2 = [\prod_{i=1}^N P_2(i)]^{1/N} \quad (10)$$

最后分别对 P_1 和 P_2 作归一化处理, 对归一化后的结果 \bar{P}_1 和 \bar{P}_2 进行融合, 得到基于复合特征的损伤成像结果 P :

$$P = \sqrt{\bar{P}_1 \bar{P}_2} \quad (11)$$

4 定子绝缘损伤检测实验系统

为了验证分级概率成像方法对定子绝缘损伤检测的有效性, 构建了大电机定子绝缘损伤检测实验系统, 如图 3 所示。

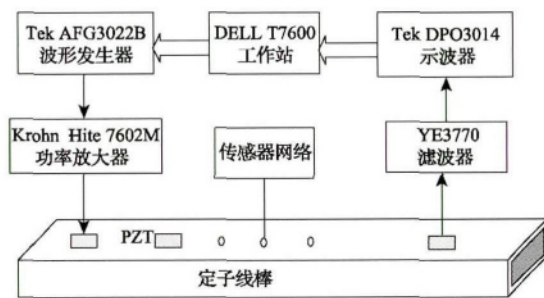


图 3 定子绝缘损伤检测实验系统

Fig. 3 The experiment system for stator insulation damage detection

图 3 中: AFG3022B 用于生成导波激励信号; 7602M 对导波激励信号进行功率放大, 以驱动 PZT 激励器; T7600 工作站用以对 DPO3014 所采集的导波信号进行信号处理和损伤成像。定子线棒试样取自 18 kV/300 MW 大电机, 主绝缘材料为环氧云母玻璃丝带模压固化而成, 厚度为 6 mm, 横截面尺寸为 60 mm × 30 mm, 如图 4 所示。

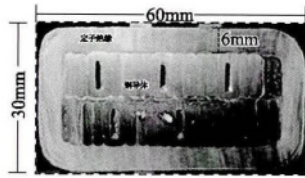


图 4 定子线棒横截面示意图

Fig. 4 The cross section diagram of the stator insulation bar

大电机定子绝缘结构的材料属性经测试^[18]: 弹性模量为 35 GPa 密度为 1 720 kg/m³; 泊松比为 0.2。通过数值求解 Rayleigh-Lamb 频率方程, Lamb 波在定子绝缘中的频散曲线如图 5 所示。

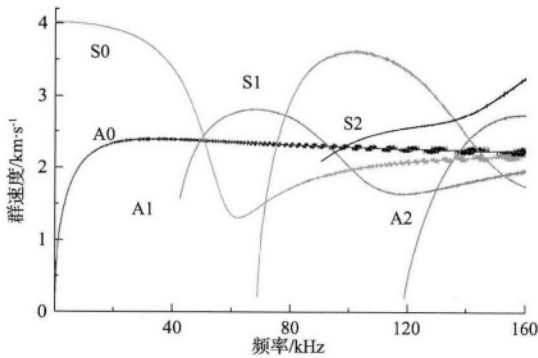


图 5 群速度频散曲线

Fig. 5 The frequency dispersion curves of group velocity

从图 5 中可以看出, 激励频率为 15 kHz 时, 导波仅存在两种模式, 即 S0 模式和 A0 模式, 因此, 采用中心频率为 15 kHz 的单脉冲加 5 个波头的汉宁窗正弦波信号作为激励信号, 信号表达方式如下:

$$u(t) = \frac{v}{4} [H(t) - H(t - 5/f_c)] \cdot (1 - \cos \frac{2\pi f_c t}{5}) \sin 2\pi f_c t \quad (12)$$

式中: v 为信号峰-峰值, f_c 为信号中心频率, $H(t)$ 为 Heaviside 阶梯函数。

PZT 压电片 (PIC151, PI® Ceramic GmbH) 通过环氧黏合剂粘贴在定子绝缘表面建立传感器网络, PZT 尺寸为: 长 20 mm, 宽 5 mm 厚度 1 mm。传感器布局如图 6 所示, 实验装置如图 7 所示。

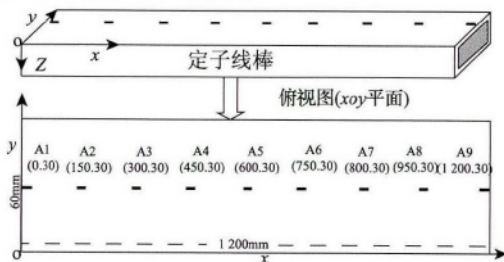


图 6 传感器位置布置示意图

Fig. 6 The position layout of the PZT sensors



图 7 定子绝缘损伤检测实验装置图

Fig. 7 Overview of the stator insulation damage detection system

5 圆孔损伤分级概率成像识别

应用分级概率成像算法对定子绝缘中位于坐标 (375, 30) 处, 直径为 1 mm、3 mm、5 mm 的圆孔损伤进行检测和识别。绝缘损伤如图 8 所示。

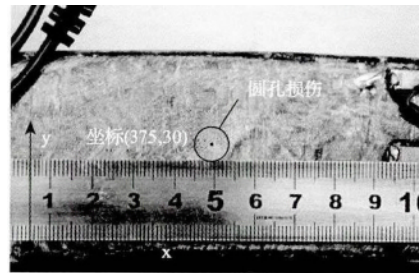


图 8 圆孔损伤示意图

Fig. 8 The circular insulation damage in the stator bar

5.1 全局概率成像结果

采用任意一个 PZT 作为作动器激励 Lamb 波, 其余 PZT 作为接收传感器, 采集损伤前后 Lamb 波信号。其中, 图 9 是以 A1 为激励, A7 接收的 Lamb 波信号。

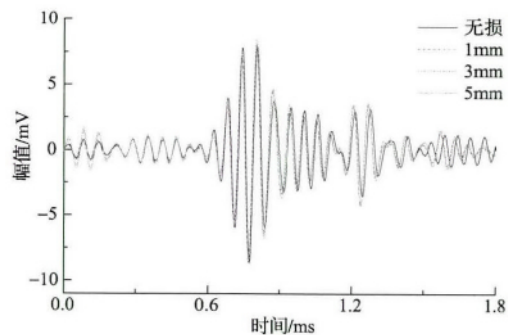


图 9 A1 ~ A7 Lamb 波监测信号

Fig. 9 Monitored Lamb wave signals from the sensing path A1 - A7

将定子绝缘结构空间均匀划分为 1200 × 60 个网格, 每一个网格代表 1 mm。根据式 (1) 计算所有传播路径下有损信号与健康无损信号的相关系数, 并利用式 (2) 计算不同空间位置损伤存在的概率, 并用图像灰度值表示, 成像结果如图 10 所示。

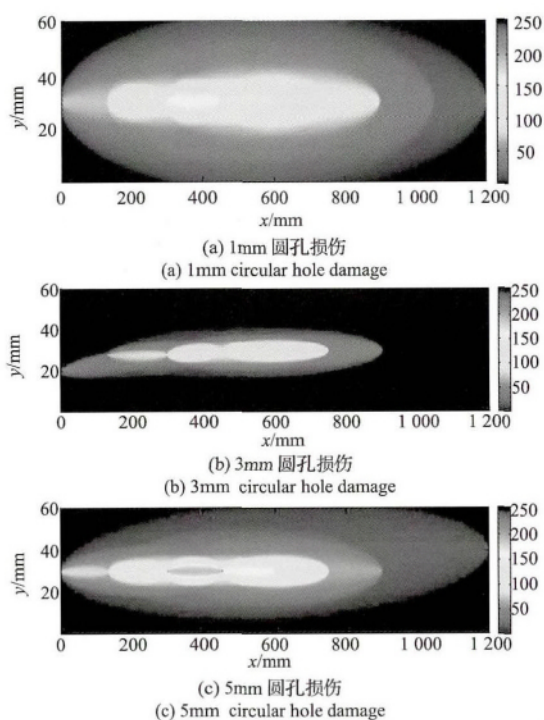


图10 圆孔损伤全局损伤概率成像结果

Fig. 10 The global damage probability imaging result for circular insulation damage

从图10中可以看出,基于相关系数的全局概率成像结果,损伤程度越大,成像结果中损伤区域的灰度值越高,并且对损伤的聚焦性也越好。但是,全局概率成像只能大致的确定损伤分布的区域,而无法确定损伤在定子绝缘中的具体位置。

5.2 局部概率成像结果

为进一步确定损伤状况,提取损伤散射波传播时间和峰值作为损伤特征进行局部概率成像。将各压电片在定子绝缘损伤时接收的 Lamb 波信号与无损时的 Lamb 波信号作差,获得损伤散射信号,并利用希尔伯特变换获得其信号包络。图11为A1激励A7接收的Lamb波散射信号包络图。

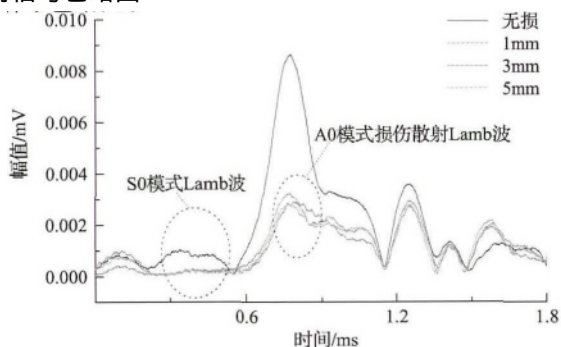


图11 A1激励A7接收的损伤散射Lamb波信号包络图

Fig. 11 Signal envelope diagram of the scattered Lamb wave signal of the damage from the A1 - A7 sensing path

从图11中可以看出S0模式包络幅值较小,波包重叠严重,难以对其进行聚焦和准确的辨识;A0模式导波相比S0模式,导波幅值更高,包络更清晰和容易辨识。因此,实验中对A0模式损伤散射波进行损伤特征提取,A1~A7路径下特征提取结果如表1所示。

表1 A1~A7路径下的损伤特征提取结果

Table 1 The damage features extracted from the A1 - A7 sensing path

损伤大小	1 mm	3 mm	5 mm
TOF/ms	0.768	0.792	0.746
包络幅值/ μV	3.231	2.913	2.791

利用所提取得损伤特征量,根据式(8)进行局部概率成像,成像结果如图12所示。

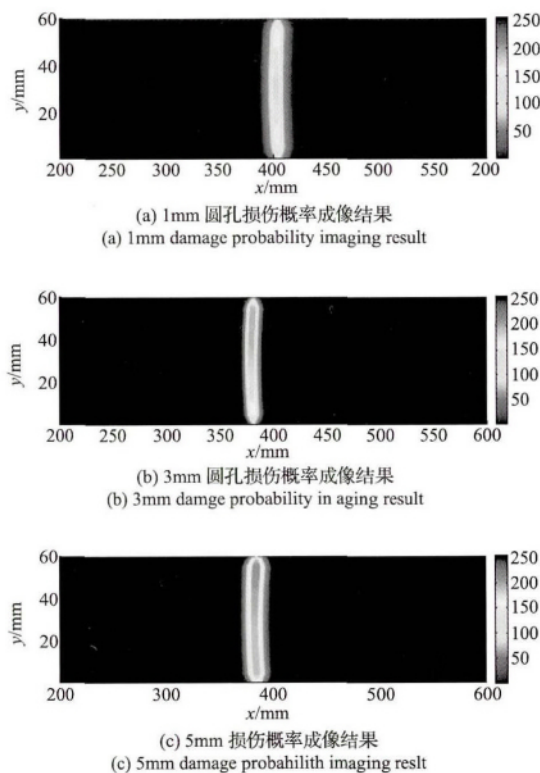


图12 圆孔损伤局部概率成像结果

Fig. 12 Local probability imaging results for circular insulation damage

从结果中可以看出,局部概率成像结果识别出的损伤位置更具体和准确,所识别出的损伤位于x方向370~410。但是,识别结果在y方向上难以区分,一方面是因为定子绝缘本身宽度狭窄(60mm);另一方面是因为受到了边界反射等噪声因素的影响,干扰了成像结果。

5.3 融合后的损伤识别结果

为了更好地突出损伤位置和损伤程度,减少噪声等

因素对成像结果的影响,将上述两种概率成像结果按照式(11)进行融合,图像融合结果如图 13 所示。

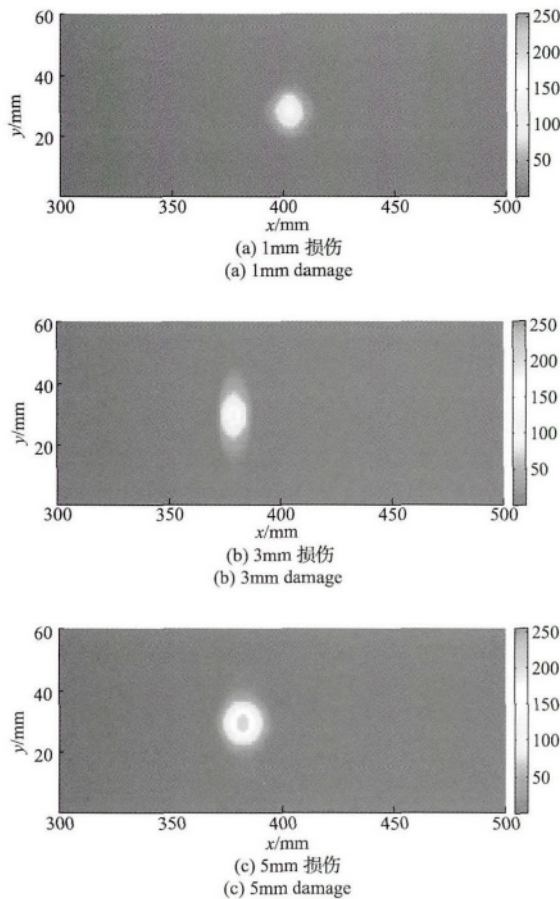


图 13 圆孔损伤分级概率成像融合算法最终结果

Fig. 13 The final imaging results of circular insulation damage with the hierarchical probability imaging fusion algorithm

从图 13 中可以看出,融合后的损伤重建图像能够直观地区分出不同程度的定子绝缘损伤,所识别出的定子绝缘损伤形状与实际损伤相符合。为了评价概率成像方法对定子绝缘损伤的位置识别精度,计算概率成像所识别出的损伤坐标与实际损伤坐标(375,30)之间的位置误差,统计结果如表 2 所示。

表 2 损伤概率成像统计结果

Table 2 Statistical results of probability damage imaging

损伤程度	方向	全局概率成像	局部概率成像	分级概率成像	误差/mm
1mm	X	260 ~ 620	400 ~ 410	403	28
	Y	20 ~ 40	2 ~ 58	28	2
3mm	X	260 ~ 580	370 ~ 385	380	5
	Y	22 ~ 38	0 ~ 60	27	3
5mm	X	240 ~ 430	380 ~ 390	383	8
	Y	22 ~ 40	0 ~ 60	29	1

从表 2 中可以看出,全局概率成像难以识别定子绝缘损伤在 x 方向上的具体位置,局部概率成像难以区分定子绝缘损伤在 y 方向上的位置,而经过融合后的概率成像 x 和 y 方向上均能对损伤进行很好的聚焦,所识别出的损伤位置与实际损伤位置相接近,能够有效地识别出定子绝缘中圆孔损伤的位置和损伤程度。

6 裂纹损伤分级概率成像识别

为了进一步验证分级概率成像算法对定子绝缘裂纹损伤的检测效果,实验中对长度为 2.6 m 的定子线棒中位于坐标(1280,30)处的 10 mm 裂纹损伤进行识别。裂纹损伤如图 14 所示。

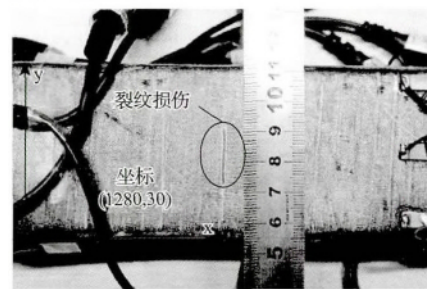
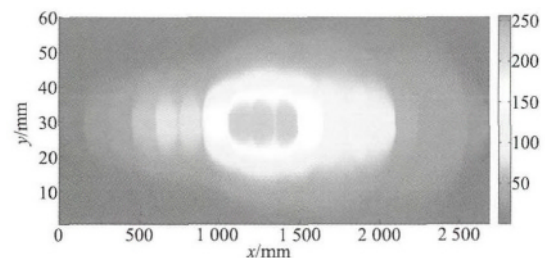


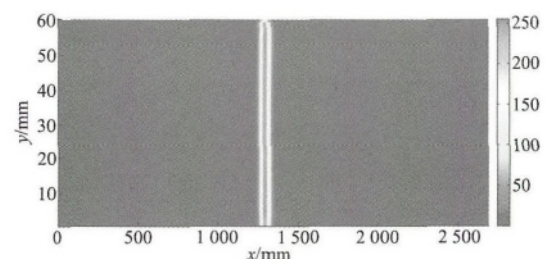
图 14 裂纹损伤示意图

Fig. 14 The schematic diagram of the crack insulation damage in the stator bar

实验过程与圆孔损伤分级概率成像步骤一致,首先进行裂纹损伤全局概率成像,成像结果如图 15(a)所示,然后进行局部概率成像,成像结果如图 15(b)所示,最后进行图像融合获得最终的分级概率成像识别结果,如图 15(c)所示。



(a) 全局概率成像结果
(a) Global probability imaging results



(b) 局部概率成像结果
(b) Local probability imaging results

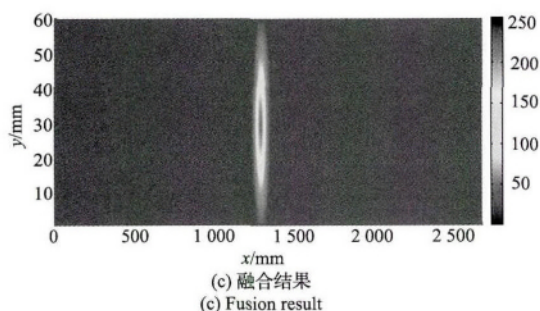


图 15 裂纹损伤分级概率成像结果

Fig. 15 Hierarchic probability imaging results of the crack damage

实验中所识别出的损伤位于坐标(1300, 29)处,与损伤实际位置相比,在长度方向上的误差为20 mm,表明分级概率成像算法能够对定子绝缘损伤进行精确定位,并且能够有效识别绝缘损伤程度,验证了本文所提出的分级概率成像方法对大电机定子绝缘中的损伤进行检测和识别的有效性和可行性。

7 结 论

针对现有的定子绝缘损伤检测方法还不能够对损伤进行定位与成像识别,本文提出了一种基于导波复合特征的分级概率成像算法,对几种典型的定子绝缘损伤进行检测和识别。从实验结果可以得出以下结论:

1) 利用相关系数作为损伤特征,能够表征损伤存在的区域。利用损伤散射导波信号特征(波包峰值和传播时间)能够进一步的表征绝缘损伤的局部特征。其中,损伤散射导波在A0模式下的时域分辨率和辨识度更高,更适合进行损伤定位及成像识别。

2) 本文所提出的分级概率成像算法,能够对定子绝缘损伤进行准确定位,并且可以有效识别出绝缘损伤的程度。因此,基于损伤复合特征的分级概率成像方法不仅可以为定子绝缘状态诊断提供更有效的参考信息,而且能够为发展大电机绝缘状态监测技术提供一种新的方法。

参考文献

[1] STONE G C. Condition monitoring and diagnostics of motor and stator windings—A review [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2073-2080.

[2] FERNANDO M A R M, NARANPANAWA W M L B, RATHNAYAKE R M H M, et al. Condition assessment

of stator insulation during drying, wetting and electrical ageing [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2081-2090.

- [3] ISTAD M, RUNDE M, NYSVEEN A. A Review of Results From Thermal Cycling Tests of Hydrogenerator Stator Windings [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(3): 890-903.
- [4] SUMEREDER C, WEIERS T. Significance of defects inside in-service aged winding insulations [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 9-14.
- [5] WANG P, MONTANARI G C, CAVALLINI A. Partial discharge phenomenology and induced aging behavior in rotating machines controlled by power electronics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 7105-7112.
- [6] HAO Y, XIE H, WANG G, et al. Assessment of insulation condition of generator stator bars based on velocity of ultrasonic waves [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2003, 10(3): 539-547.
- [7] 许西宁, 叶阳升, 江成, 等. 钢轨应力检测中超声导波模态选取方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2473-2483.
- XU X N, YE Y SH, JIANG CH, et al. Research on method for mode selection of guided ultrasonic waves in stress measurement of rails [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2473-2483.
- [8] SU Z, YE L, LU Y. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review [J]. Journal of Sound & Vibration, 2006, 295(3): 753-780.
- [9] BEN B S, BEN B A, VIKRAM K A, et al. Damage identification in composite materials using ultrasonic based Lamb wave method [J]. Measurement, 2013, 46(2): 904-912.
- [10] 王兴君, 黄莺. 使用压电传感器对复合薄板冲击力位置的确定 [J]. 电子测量技术, 2013, 36(10): 78-81.
- WANG X J, HUANG Y. Impact location of composite plates using piezoelectric sensors [J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(10): 78-81.
- [11] 孙虎, 周丽. 基于分形维数的复合材料结构损伤成像 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 401-407.
- SUN H, ZHOU L. Damage imaging for composite structures based on fractal dimension [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(2): 401-407.
- [12] NG C T, VEDIT M. A Lamb-wave-based technique for damage detection in composite laminates [J]. Smart Materials & Structures, 2009, 18(7): 5844-5877.
- [13] 王强, 严夏君, 陈小惠, 等. 无基准 Lamb 波时间反转损伤概率成像监测方法 [J]. 仪器仪表学报, 2013,

- 34(7):1588-1594.
WANG Q, YAN X J, CHEN X H, et al. Baseline free Lamb wave damage probability imaging monitoring method based on time reversal theory [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(7):1588-1594.
- [14] WANG D, YE L, SU Z, et al. Probabilistic damage identification based on correlation analysis using guided wave signals in aluminum plates [J]. Structural Health Monitoring, 2010, 9(2):133-144.
- [15] 冯勇明, 杨建元, 陈卫东 等. 基于概率成像的复合材料结构健康监测系统 [J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(3):253-257.
FENG Y M, YANG J Y, CHEN W D, et al. Structural health monitoring system for composite material based on probabilistic damage imaging [J]. Journal of Electronic Measurement & Instrument, 2013, 27(3):253-257.
- [16] 杜云朋, 王建斌, 靳小强. 超声导波管道检测的小波模极大值去噪法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(7):683-687.
DU Y P, WANG J B, JIN X Q. Defect detection of ultrasonic guided wave pipeline using de-noising method based on wavelet modulus maximum [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(7):683-687.
- [17] 邱爱中, 邱大为, 郝华辉. 一种新的平移不变多小波算法及其降噪法研究 [J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(10):5-7.
QIU AI ZH, QIU D W, HAO H W. Study on the denoising based on translation-invariant multiwavelets [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(10):5-7.

- [18] 李锐华, 潘玲, 严辰 等. 基于导波的大电机定子绝缘损伤检测实验研究 [J]. 高电压技术, 2014, 40(5):1539-1545.

LI R H, PAN L, YAN CH, et al. Experimental research on damage detection of large generator stator insulation based on guided waves [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5):1539-1545.

作者简介



李豪 2011 年于江苏科技大学获得学士学位, 现为同济大学博士研究生, 主要研究方向为电力设备智能化监测技术。

E-mail: 2013jacob@tongji.edu.cn

Li Hao received his B. Sc. degree in 2011 from Jiangsu University of Science and Technology. Now, he is a Ph. D. candidate in Tongji University. His main research interest includes intelligent monitoring technology of power equipment.



李锐华(通讯作者) 2004 年于西安交通大学获得博士学位, 现为同济大学副教授, 硕士与博士生导师, 主要研究方向为电气设备状态检测与智能诊断技术。

E-mail: rhli@tongji.edu.cn

Li Ruihua (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2004 from Xi'an Jiaotong University. Now, he is an associate professor and master & doctoral supervisor in Tongji University. His research interest mainly includes state detection and intelligent diagnosis of electrical equipment.