

# 基于导波的大电机定子绝缘损伤定位仿真研究

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:** 提出了一种基于导波的大电机定子绝缘损伤定位方法。通过求解 Rayleigh-Lamb 频率方程获取导波在定子绝缘中的频散曲线。利用 Abaqus 有限元分析软件建立了横向裂纹, 纵向裂纹、气隙和分层 4 种典型定子绝缘结构损伤模型, 对导波在定子绝缘结构中的激励、接收和传播特性进行了数值模拟。在此基础上, 采用小波尺度谱提取损伤散射信号飞行时间确定损伤位置, 对不同模式下的导波损伤定位精度进行了分析。仿真结果和理论分析说明了本文方法的损伤定位精度。

**关键词:** 大电机; 定子绝缘; 状态评估; 损伤定位; 弹性导波; 小波变换

中图分类号: TM3 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 11-2816-06

DOI:10.16182/j.cnki.joss.2015.11.029

## Simulation Study on Damage Localization of Large Generator Stator Insulation Based on Guided Waves

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

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

**Abstract:** A stator insulation damage localization method based on guided waves was proposed. The dispersive curve was obtained by solving the Rayleigh-Lamb equations. Finite structure models of four typical groundwall insulation damage, i.e. void, delamination, longitudinal and transverse crack were established by FEM software Abaqus, in which the excitation, acquisition and propagation properties of guided wave were numerical simulated. Based on that, wavelet scalogram was used to extract the flight time of damage-scattered wave to obtain the insulation damage location. Analysis was conducted to compare the location precision under each wave modes. Simulation results indicate that the method is effective to locate insulation damage with a high precision.

**Keywords:** large generator; stator insulation; condition assessment; damage location; guided-wave; wavelet transform

## 引言

定子绕组是大型发电机中的关键部件, 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性<sup>[1-2]</sup>。由于受到电、热、机械和环境因素的联合作用, 定子绝缘在长期的运行过程中其机械性

能、介电性能逐渐变坏, 即发生老化, 最终导致绝缘失效<sup>[3]</sup>。目前对大型发电机定子绝缘进行状态评定主要依靠绝缘老化过程中的宏观电气参量, 如: 绝缘电阻, 极化系数, 吸收比, 局部放电参量等。但是这些特征参量难以反映绝缘老化的微观本质即结构性损伤的产生与发展。研究表明, 定子绝缘中的结构性损伤是绝缘性能劣化的主要原因<sup>[1-3]</sup>。因此, 及时、准确地检测出定子绝缘中的结构损伤, 将为大电机绝缘状态诊断提供有效和可靠的参考信息。

目前, 利用声学检测方法能够检测出定子绝缘



收稿日期: 2015-02-01 修回日期: 2015-04-23;  
基金项目: 国家自然科学基金(51177110);  
作者简介: 李豪(1989-), 男, 安徽, 博士, 研究方向为电力设备绝缘损伤检测及健康性监测; 李锐华(1971-), 男, 陕西, 副教授, 研究方向为电力设备绝缘状态诊断与寿命评估。

http: www.china-simulation.com

• 2816 •

中缺陷的发生和发展。文献[4]通过声谱分析,对热老化过程中的绝缘气隙、分层等缺陷进行了检测。文献[5]利用超声法对绝缘中环氧云母玻璃丝带层夹板内部缺陷进行了检测。文献[6]通过解析定子绝缘热循环测试中分层损伤形成时所产生的应力弹性波,对损伤发生时刻进行了检测。这些声学检测方法对绝缘微观缺陷有一定的检测能力,但它们无法确定损伤在定子绝缘中位置。

大电机定子绝缘属于层压复合材料结构,近年来利用导波进行复合材料损伤检测引起了广泛研究[7]。导波可以在结构中单点激励,低衰减和长距离地传播,并对传播介质中的微小损伤和初始损伤较为敏感。利用导波在目标结构中的传播速度及由损伤引起的导波信号飞行时间,不仅可以判断损伤存在,而且可以确定损伤位置。

针对大电机定子绝缘状态评估方法难以确定损伤具体位置,本文提出了一种基于导波的大电机定子绝缘损伤定位方法并通过有限元仿真,验证了该方法的有效性。

## 1 Lamb 波定子绝缘损伤定位原理

### 1.1 大电机定子绝缘结构

容量在 50 MVA 以上的大电机通常采用定子线棒模绕成型的绕组结构[2]。定子线棒主要由铜导体和绝缘材料组成。其中,定子绝缘环绕在中间为导电的铜股线排四周,用以分割铜导体和接地的定子铁心,如图 1 所示。

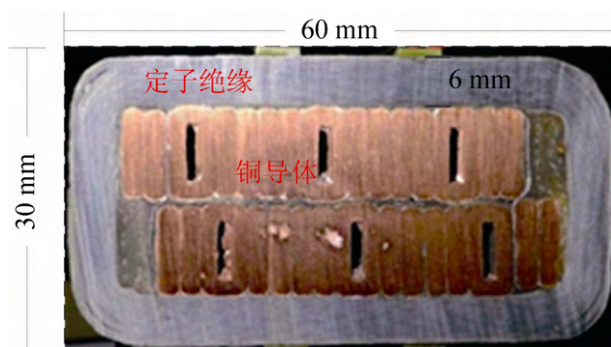


图 1 定子绝缘线棒断面图

定子绝缘普遍采用以玻璃纤维补强的环氧云母带模压固化而成,属于一种层压复合材料[3]。由于受到多种因素的联合作用,定子绝缘在长期运行过程中会逐渐产生结构性损伤。这些损伤将降低定子绝缘介电性能,在强电场的作用下甚至导致绝缘击穿,严重危害大电机的运行可靠性。

### 1.2 Lamb 波基本理论

Lamb 波是一种在固体板状结构中传播的弹性导波,其传播时声场遍及整个板的厚度并对由损伤引起的应力变化十分敏感。Lamb 波具有多模态和频散特性[7]:多模态特性是指 Lamb 波在传播时存在多种模式,如对称模式  $S_0, S_1, S_2, \dots$ , 反对称模式  $A_0, A_1, A_2, \dots$ , 这些模式可相互独立地传播;频散特性是指 Lamb 波的相速度和群速度随频率的变化而发生弥散。描述 Lamb 波的理论依据是 Rayleigh-Lamb 频率方程[8], 定义如下:

$$\frac{\tan(qd/2)}{\tan(pd/2)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad \text{对称模式} \quad (1)$$

$$\frac{\tan(qd/2)}{\tan(pd/2)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \quad \text{反对称模式} \quad (2)$$

$$\text{其中: } p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2 \quad (3)$$

$$q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2 \quad (4)$$

式中:  $d$  为板厚;  $k$  是 Lamb 波沿传播方向上的波数,其数值等于  $k = 2\pi / \lambda$ ,  $\lambda$  为 Lamb 波长;  $\omega$  为波的角频率;  $c_L$  和  $c_T$  分别为板材的纵波和横波速度,分别由式(5)和(6)得到:

$$c_L = \sqrt{\left(\frac{1-\nu}{1-\nu-2\nu^2}\right) \frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6)$$

其中:  $E$  为弹性模量;  $\nu$  为泊松比;  $\rho$  为材料密度。通过数值求解(1)和(2)可以获得 Lamb 波的相速度  $c_p$  和群速度  $c_g$ , 分别为:

$$c_p = (\omega / 2\pi)\lambda \quad (7)$$

$$c_g = \frac{d(kc_p)}{dk} = c_p + k \frac{dc_p}{dk} \quad (8)$$

通过式(7)和式(8)能够获取导波在定子绝缘结构中的传播特性(频散曲线),为应用导波进行定子绝缘损伤检测提供参考依据。

### 1.3 定子绝缘损伤定位原理

大电机定子绝缘可以近似的认为是一种狭长的板状结构。利用导波传播特性,进行定位绝缘损伤定位(长度方向)的原理如图 2 所示。

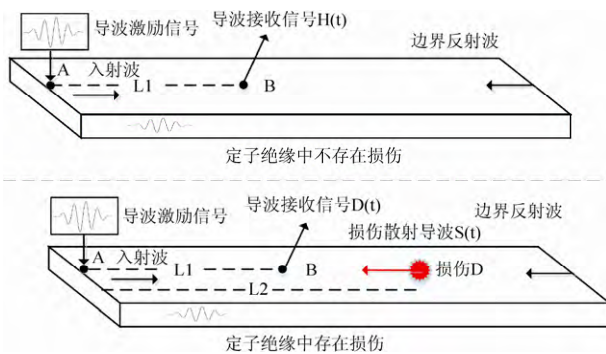


图 2 基于导波的定子绝缘损伤定位示意图

在定子绝缘 A 处施加导波激励信号  $E(t)$ , 距 A 长度方向  $L1$  的 B 处接收导波。当定子绝缘中不存在损伤时, B 点接收的导波信号为  $H(t)$ ; 假定在距 A 点长度方向  $L2$  的 D 处存在损伤。根据导波理论, 导波传播至 D 处会发生散射<sup>[11-12]</sup>。B 点接收的导波信号  $D(t)$  与无损信号  $H(t)$  相比包含了由损伤引起的散射波  $S(t)$ 。忽略其他因素的影响,  $S(t)$  可以通过下式获得:

$$S(t) = D(t) - H(t) \quad (9)$$

$S(t)$  可以被认为是 A 点激励(激励时刻为  $t_0$ )的导波传播至损伤 D 后反射至 B 点的导波信号。假定导波在定子绝缘中的波速为  $V_g$ , 散射导波  $S(t)$  的到达 B 点的时刻为  $t_1$ , 则损伤在定子绝缘中的位置  $L2$  可以确定为:

$$L2 = \frac{1}{2} [V_g \cdot (t_1 - t_0) + L1] \quad (10)$$

由上述分析, 当波速  $V_g$  和损伤散射波飞行时间  $t_1 \sim t_0$  确定后即可确定损伤位置。事实上, 飞行

时间的提取一直是应用 Lamb 波进行复合材料损伤检测的难点<sup>[7-8]</sup>。一方面, 这是因为具有不同的波速的多模态 Lamb 波传播时波包容易发生混叠; 另一方面, Lamb 波在复合材料中传播时频散效应加剧, 波包发生扩展和变形<sup>[9]</sup>。

针对定子绝缘层压复合材料特点, 为了有效提取 Lamb 波在定子绝缘中的飞行时间, 本文利用小波变换能够有效表征信号时频域局部特征的特点<sup>[10]</sup>, 对  $E(t)$  和  $S(t)$  进行连续小波变换, 分别提取导波波包在激励频率下的能量谱峰值时刻作为式(10)中的激励时刻  $t_0$  和到达时刻  $t_1$ , 从而确定损伤在定子绝缘中的位置。

## 2 有限元仿真模型建立

### 2.1 定子绝缘有限元结构模型

利用 Abaqus 有限元仿真软件, 建立原型为某大型发电机(18 kV, 300 MW)定子线棒(见图 1)有限元结构模型, 其中, 线棒长度为 1 200 mm, 绝缘厚度为 6 mm, 横截面尺寸为 60 mm×30 mm。定子绝缘复合材料特性参数经反演推算<sup>[11]</sup>见表 1。图 3 所示为所建立的定子绝缘结构有限元模型。

表 1 大电机主绝缘材料特性参数

$E/GPa$	$\nu$	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$
43.737	0.419 8	4 200

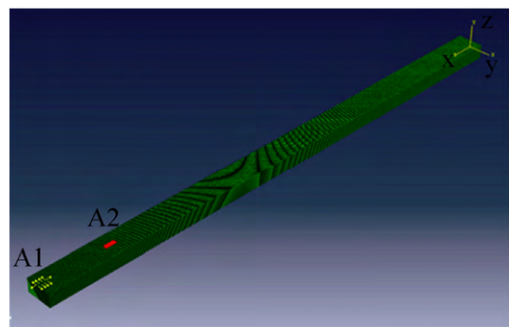


图 3 定子绝缘三维有限元模型

在定子绝缘左端部的 A1 处, 通过点载荷方式激励 Lamb 波, 激励信号采用 5 个波头汉宁窗正弦脉冲信号:

$$u(t) = \frac{v}{4} [H(t) - H(t - 5 / f_c)] \cdot (1 - \cos \frac{2\pi f_c t}{5}) \sin 2\pi f_c t \quad (11)$$

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。在距离 A1 点长度方向(x 方向) 150 mm 的 A2 处，通过提取该点的应力形变信号，获得 Lamb 波接收信号。

### 2.2 定子绝缘中的 Lamb 波传播特性

为了获得 Lamb 波在定子绝缘中的传播特性，根据表 1 中的材料属性参数，通过数值方法求解式(1)和式(2)获得 Lamb 波在定子绝缘结构中的频散曲线，如图 4 所示。

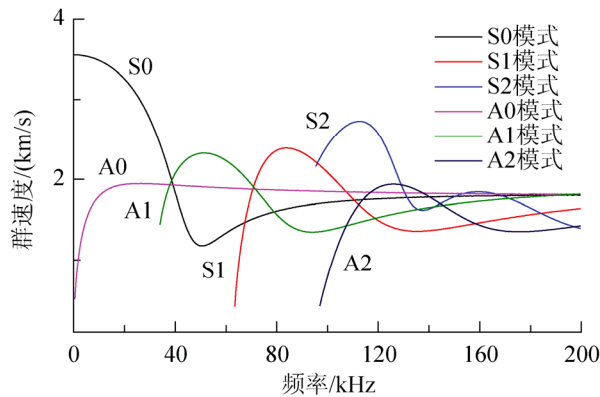


图 4 群速度频率曲线

从图 4 中可以看出，Lamb 波在定子绝缘中的传播模态和频散特性主要取决于导波激励中心频率。合适的激励频率能够减少导波信号处理的难度和提高损伤识别的精度。导波激励中心频率选择的基本原则<sup>[9]</sup>：(1)导波模式尽量少；(2)尽可能降低频散效应的影响。根据上述原则，本文选择 Lamb 波激励中心频率为 13 kHz(即  $f_c = 13$  kHz)。如图 4 所示，当激励频率为 13 kHz 时，Lamb 波在定子绝缘中仅存在 S0 和 A0 两种模态，它们的群速度随频率的变化相对平缓，能够有效地抑制速度频散；S0 模式 Lamb 波群速度近似为 A0 模式 Lamb 波的两倍，这有利于更好地识别和区分 S0 模式和 A0 模式各自的波包；此外，A0 模式 Lamb 波的波长更小，根据导波损伤检测理论<sup>[7]</sup>，A0 模式具有更高

的损伤敏感性。

### 2.3 定子绝缘结构损伤模型

横向裂纹、纵向裂纹、气隙和分层是四种典型的定子绝缘结构损伤。为了验证导波对绝缘损伤进行定位的效果，在定子线棒长度方向(x) 825 mm 处模拟以上四种典型绝缘损伤，其中：图 5(a)所示为直径  $\varnothing 1$  mm，深度为 6 mm(z)的纵向裂纹损伤；图 5(b)所示为 1 mm(x)，10 mm(y)，1 mm(z)的表面裂纹损伤；图 5(c)所示为直径  $\varnothing 2$  mm，深度为 1 mm(z)的定子主绝缘内部气隙损伤，图 5(d)所示为 5 mm(x)，10 mm(y)，1 mm(z)的分层损伤。

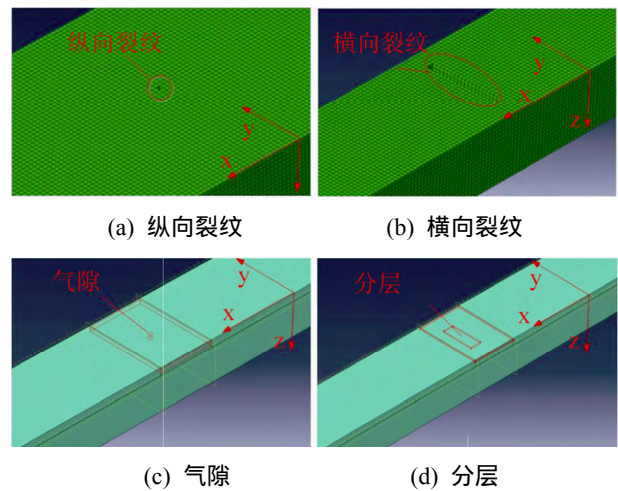


图 5 典型定子绝缘损伤有限元模型

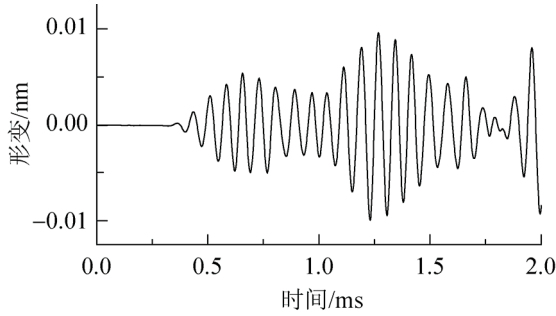
## 3 定子绝缘损伤定位结果分析

### 3.1 损伤散射导波飞行时间提取

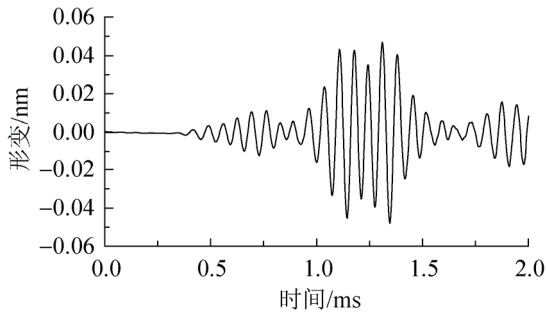
如前所述，提取损伤散射导波飞行时间是进行损伤定位的关键。为此，将有损时 A2 导波接收信号减去其无损时导波接收信号，获得四种典型绝缘损伤的损伤散射导波信号，分别如图 6 所示。

图 6 中的损伤散射信号在时域上发生了波包变形及混叠，难以识别导波模态及确定飞行时间。为了有效提取损伤散射信号飞行时间，对图 6 中的损伤散射信号进行连续小波变换<sup>[10,12]</sup>，其中：信号采样频率为 1 MHz，小波基函数选择复 Morlet 小

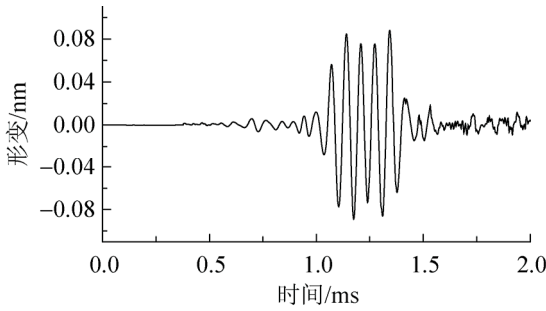
波，中心频率和带宽分别取 2 和 1。将小波尺度变换至频率范围 0~50 kHz，以突出散射信号在导波中心频率(13 kHz)附近的时频特性，图 7 为经过小波变换后的损伤散射信号小波尺度谱图。



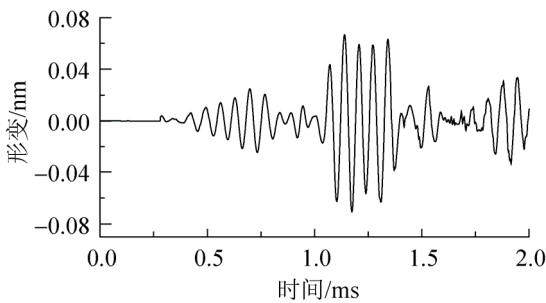
(a) 纵向裂纹



(b) 横向裂纹

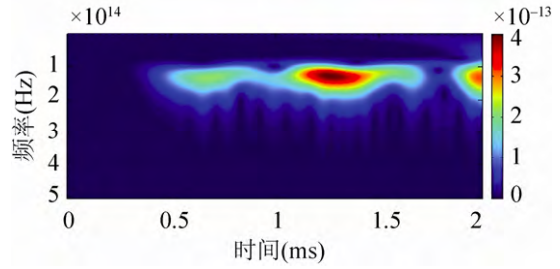


(c) 气隙

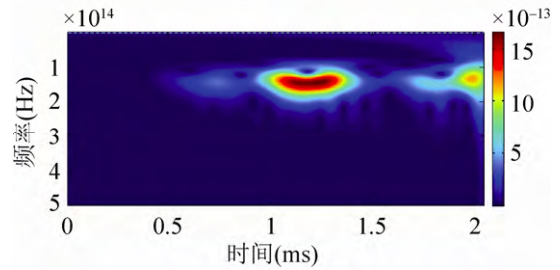


(d) 分层

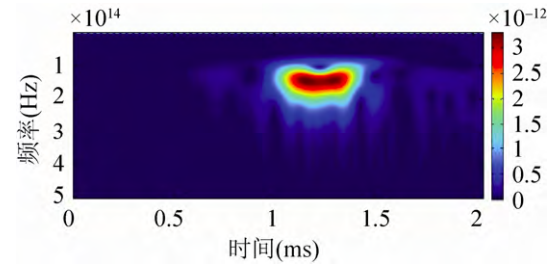
图 6 定子绝缘损伤散射导波信号时域波形



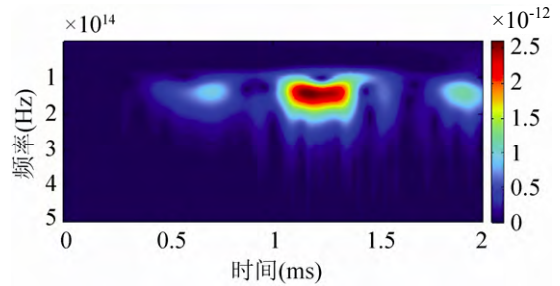
(a) 纵向裂纹损伤散射 Lamb 波信号小波尺度谱图



(b) 横向裂纹损伤散射 Lamb 波信号小波尺度谱图



(c) 气隙损伤散射 Lamb 波信号小波尺度谱图



(d) 分层损伤散射 Lamb 波信号小波尺度谱图

图 7 小波变换后的损伤散射信号小波尺度谱图

从图 7 中可以有效识别出导波模式。A0 模式具有更高的时频能量和更明显的信号特征；与 A0 模式相比，S0 模式特征不明显，如图 7(c)中 S0 模式能量十分微弱。由此可见，小波尺度谱能够对导波进行很好的时频聚焦，有利于确定目标模式导波的到达时间。分别提取导波在 13 kHz 频率下 A0 模式和 S0 模式的小波能量峰值时刻(到达时刻  $t_1$ )，具体结果见表 2 和表 3。

表 2 A0 模式损伤散射信号定位结果(x 方向)

损伤类型	$t_1$ /ms	定位结果 /mm	定位误差/mm	相对误差%
纵向裂纹	1.237	864.11	39.11	4.74%
横向裂纹	1.146	795.26	29.74	3.60%
气隙	1.151	799.05	25.95	3.15%
分层	1.153	800.56	24.44	2.96%

表 3 S0 模式损伤散射信号定位结果(x 方向)

损伤类型	$t_1$ /ms	定位结果 /mm	定位误差/mm	相对误差%
纵向裂纹	0.646	769.42	59.58	7.22
横向裂纹	0.723	916.05	81.05	9.71
气隙	0.736	903.60	78.60	9.53
分层	0.712	866.92	41.92	5.08

### 3.2 定子绝缘损伤定位结果

依据前述定子绝缘损伤定位原理,由式(10)计算绝缘损伤在定子线棒长度方向(x 方向)上的位置。为了分析不同模态导波的损伤定位效果,分别在 S0 模式和 A0 模式下利用导波对绝缘损伤进行定位,损伤定位统计结果如表 2 和表 3 所示。其中, S0 模式和 A0 模式 Lamb 波波速分别为 3 057 m/s 和 1 513 m/s,激励时刻  $t_0$  为 0.193 9 ms。

统计结果表明,利用导波能够有效识别定子绝缘中的纵向裂纹,横向裂纹,气隙和分层四种损伤在长度方向(x 方向)上的位置。定位结果与实际损伤位置(825 mm, x 方向)接近。其中, A0 模式下导波损伤定位精度小于 5%, S0 模式下导波损伤定位精度小于 10%。对比表 2 和表 3 可以看出: A0 模式导波定位精度优于 S0 模式。究其原因:一方面, A0 模式导波在 13 kHz 时波长更小(如图 4 所示),其对绝缘损伤更敏感;另一方面, A0 模式损伤散射信号具有更高的时频能量和聚焦性(如图 7 所示),能够更有效地表征损伤特征。

## 4 结论

(1) 损伤散射信号飞行时间是利用导波进行定子绝缘损伤定位的关键。利用小波尺度谱能够有效识别导波模态和提取导波飞行时间,能够用于定子绝缘损伤的定位。

(2) 基于导波对定子绝缘中的纵向裂纹,横向裂纹,气隙和分层四种典型损伤进行了数值模拟及损伤定位,仿真结果表明:与 S0 模式相比, A0 模式导波对损伤更为敏感,且具有更高的损伤定位精度,定位精度 < 5%,更适合于定子绝缘损伤的定位。

### 参考文献:

- [1] Fernando M, Naranpanawa W, Rathnayake R, *et al.* Condition assessment of stator insulation during drying, wetting and electrical ageing [J]. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on (S1070-9878), 2013, 20(6): 2081-2090.
- [2] Stone G C. Condition monitoring and diagnostics of motor and stator windings—A review [J]. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on (S1070-9878), 2013, 20(6): 2073-2080.
- [3] Sumereder C, Weiers T. Significance of defects inside in-service aged winding insulations [J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on (S1070-9878), 2008, 23(1): 9-14.
- [4] Timperley J E, Klinec D A. Acoustic spectrum analysis of high voltage mica based insulation systems [C]// Electrical Electronics Insulation Conference, 1995, and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, Proceedings. USA: IEEE, 1995: 599-603.
- [5] 郝艳捧, 王国利. 超声法检测发电机定子线棒绝缘缺陷 [J]. 高电压技术, 2000, 26(6): 10-17.
- [6] Zhu H, Kung D, Cowell M, *et al.* Acoustic monitoring of stator winding delaminations during thermal cycling testing [J]. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on (S1070-9878), 2010, 17(5): 1405-1410.
- [7] Su Z, Ye L, Lu Y. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review [J]. Journal of Sound and Vibration (S0022-460X), 2006, 295(3): 753-780.
- [8] Li F C, Meng G, Ye L, *et al.* Dispersion analysis of Lamb waves and damage detection for aluminum structures using ridge in the time-scale domain [J]. Measurement Science and Technology (S0957-0233), 2009, 20(9): 1-10.
- [9] 孙学伟, 李富才, 孙凯, 等. 厚梁结构中的导波传播与激励频率选择研究 [J]. 噪声与振动控制, 2012, 31(6): 10-14.
- [10] 廖传军, 李学军, 刘德顺. 小波再分配尺度谱在声发射信号特征提取中的应用 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 273-279.
- [11] 孔铭, 李富才, 周利民. 应用兰姆波测定材料弹性参数的反演方法 [J]. 噪声与振动控制, 2014, 5(5): 228-233.
- [12] 罗光坤, 张令弥. 基于Morlet小波变换的模态参数识别研究 [J]. 振动与冲击, 2007, 26(7): 135-138.