本文引用格式: 李濛,洪晓丰,黄嘉盛.高压电缆铝护套腐蚀缺陷周向超声导波检测技术[J].自动化与信息工程,2022,43(4):1-6. LI Meng, HONG Xiaofeng, HUANG Jiasheng. Circumferential ultrasonic guided wave detection technology for corrosion defect of aluminum sheath of high voltage cable[J]. Automation & Information Engineering, 2022,43(4):1-6.

高压电缆铝护套腐蚀缺陷周向超声导波检测技术

李濛1 洪晓丰2 黄嘉盛1

(1.广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510000

2.广东工华高新检测科技有限公司,广东 广州 510765)

摘要:高压电缆铝护套腐蚀是电缆附件接地系统故障的主要原因之一。针对现有无损检测技术难以准确检 测被多层材料包裹的铝护套腐蚀缺陷问题,提出一种基于周向超声导波的高压电缆铝护套腐蚀缺陷检测方法。首 先,分析周向导波在高压电缆铝护套腐蚀缺陷检测中的传播机理;然后,通过 Abaqus 有限元软件建立周向超声 导波传播模型,确定高压电缆铝护套腐蚀缺陷周向超声导波检测方式和关键参数,仿真结果表明周向超声导波相较 于轴向超声导波具有更好的检测灵敏度和定位精度激励信号,且激励信号为1MHz的周向超声导波相较于 500 kHz 和 1.5 MHz 的周向超声导波对铝护套腐蚀缺陷有更好的检测效果,为现场检测提供重要依据。

关键词:周向超声导波;电缆铝护套;腐蚀缺陷;有限元仿真

中图分类号: TH128 文献标识码: A 文章编号: 1674-2605(2022)04-0001-06

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2022.04.001

Circumferential Ultrasonic Guided Wave Detection Technology for Corrosion Defect of Aluminum Sheath of High Voltage Cable

LI Meng¹ HONG Xiaofeng² HUANG Jiasheng¹

Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd. Guangzhou 510000, China
Guangdong Gonghua High Tech Testing Technology Co., Ltd. Guangzhou 510765, China)

Abstract: The corrosion of aluminum sheath of high voltage cable is one of the main problems in the grounding system of cable accessories. Aiming at the problem that the existing nondestructive testing technology is difficult to accurately detect the corrosion damage of aluminum sheath wrapped by multi-layer materials, a method for detecting the corrosion defect of aluminum sheath of high-voltage cable based on circumferential ultrasonic guided wave is proposed. Firstly, the propagation mechanism of the circumferential guided wave in the corrosion detection of the aluminum sheath of the high-voltage cable is analyzed; Then, the propagation model of circumferential ultrasonic guided wave is established by Abaqus finite element software, and the circumferential ultrasonic guided wave has better detection sensitivity and positioning accuracy than the axial ultrasonic guided wave, And the circumferential ultrasonic guided wave with the excitation signal of 1 MHz has better detection effect on the corrosion defects of aluminum sheath than the circumferential ultrasonic guided wave with the excitation signal of 1 MHz has better detection effect on the corrosion defects of aluminum sheath than the circumferential ultrasonic guided wave with the excitation signal of 500 kHz and 1.5 MHz, which provides an important basis for on-site inspection.

Keywords: circumferential ultrasonic guided wave; cable aluminum sheath; corrosion defect; finite element simulation

0 引言

随着城市化水平的不断提高,电力需求也急剧上 升;电力电缆作为城市电网的重要组成部分,其需求 也急剧增长^[1]。电缆附件接地系统主要由两部分组成: 1) 电缆附件尾管与电缆金属护套连接处,该处采用 铅封或焊接铜编织带工艺进行电气连接;2) 接地线

2022年第43卷第4期自动化与信息工程1

或同轴电缆。电缆金属护套为能够承受短路电流冲击, 防止径向透水,保护绝缘线芯,通常使用皱纹铝护套 与电缆附件尾管连接^[2]。在电缆附件尾管与电缆铝护 套连接处,由于焊接不良或防水措施不佳,可能致使 焊接处的电缆铝护套发生电化学腐蚀,使电缆铝护套 未能有效接地,从而产生悬浮电压,导致电缆或附件 被击穿,对电力系统造成破坏,甚至危害人员生命安 全^[3]。因此,针对电缆铝护套的腐蚀缺陷检测具有现 实意义^[4]。

常用的无损检测方式有磁粉检测、涡流检测、红 外检测、超声检测等^[5]。磁粉检测仅用于检测铁磁材 料,对于高压电缆附件这种具有多层不同类型材料的 结构难以准确检测;涡流检测主要集中于数个集肤深 度,检测深度较浅,难以检测到高压电缆铝护套上的 腐蚀缺陷;红外检测穿透力低,抗干扰能力差,对早 期缺陷和微弱损伤识别的灵敏度低,不适合电缆内部 损伤检测;常规超声检测仅限于点对点检测,在多层 结构中超声的折射和反射较为复杂,难以提取有效的 回波信号。

超声导波检测具有传播距离远、检测范围大、检 测效率高等特点69,广泛应用于铁路、石油运输管道、 船舶、航空航天等领域。同时,超声导波技术对早期 损伤和微小缺陷具有较好的敏感度印。将超声导波引 入高压电缆附件的腐蚀缺陷检测,具有重要的实用价 值和潜在的经济效益。近几年,国内外学者对管道结 构的超声导波检测进行了大量研究。朱龙翔等[8]利用 半解析有限元法对弯管中的导波传播特性进行研究, 计算导波频散曲线和各模态导波的振动特征,并分析 两者间的关系。WILCOX 等^[9]结合仿真实验,验证管 道中纵向模态导波遇到缺陷时的模态转换现象,并建 立缺陷尺寸与导波反射强度之间的关系。ICHCHOU 等1101研究管道中导波传播的混叠效应,讨论导波有限 元法的数值敏感性、群速度和能流速度的关系。然而, 高压电缆附件中的铝护套为复杂的螺纹管结构, 超声 导波在电缆铝护套中的传播机理复杂,且不同模态的 导波在铝护套的传播过程中群速度随频率的变化较 大,出现较为明显的频散现象。目前,亟需一种合适 的导波模态,以准确检测腐蚀缺陷。

本文提出一种基于周向超声导波的高压电缆铝 护套腐蚀缺陷检测方法及仿真研究,在分析高压电缆 铝护套中周向超声导波传播特性的基础上,基于有限 元仿真技术验证周向超声导波在高压电缆铝护套中 的传播路径和腐蚀缺陷检测的可行性,并得到适合的 频率,为激励和采集方式的确定提供理论依据。

1 高压电缆铝护套周向超声导波传播机理

超声导波在高压电缆铝护套的螺纹管结构中以 弹性波的形式传播。超声导波具有频散和多模态特性。 其中,频散特性主要表现为群速度与相速度不相等; 多模态特性主要表现为在一定频率下存在不止一种 导波模态。在管道结构中的超声导波按照传播方向可 分为轴向导波和周向导波两类。检测时根据管道的材 料种类和结构选取适合的导波类型。轴向导波和周向 导波在高压电缆铝护套中的传播示意图如图 1 所示。



(a) 轴向导波传播示意图



(b) 周向导波传播示意图

图 1 高压电缆铝护套中导波传播示意图

为便于有限元仿真,将高压电缆铝护套结构简化 为波纹管结构。周向导波在波纹管的传播过程满足 Navier 控制方程:

$$\mu \nabla^2 \boldsymbol{u} + (\boldsymbol{\varphi} + \boldsymbol{\mu}) \nabla (\nabla \boldsymbol{\cdot} \boldsymbol{u}) = \rho(\frac{\partial^2 \boldsymbol{u}}{\partial t^2})$$
(1)

式中:

μ和 φ——Lame 常数;
u——各向同性介质位移矢量;
φ——被测物密度;

∇——三维拉普拉斯算子。

周向导波的振动方向只有一个,且与传播方向垂 直,故此时只有轴向位移,可将式(1)简化为

$$\mu \nabla^2 \boldsymbol{u}_z = \rho \bullet \frac{\partial^2 \boldsymbol{u}_z}{\partial t^2}$$
(2)

将管道看作无限长,其应力自由边界条件为

$$\sigma_{rr} = \sigma_{r\theta} = \sigma_{rz} = 0(r = a, b) \tag{3}$$

式中:

a——管道内径;

b——管道外径。

对 Navier 控制方程求解得到相应的位移场。此时频率方程为

$$D = \begin{vmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} & d_{45} & d_{46} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} & d_{54} & d_{55} & d_{56} \\ d_{61} & d_{62} & d_{63} & d_{64} & d_{65} & d_{66} \end{vmatrix}$$

(4)

该式可以分解为

$$D = \boldsymbol{D}_1 \boldsymbol{\bullet} X = 0$$

式中:

即

$$\boldsymbol{X} = (A_1, A_2)^{\mathrm{T}} \circ$$

为使线性方程组有非零解,系数行列式必为零,

$$\boldsymbol{D}_{1} = \begin{vmatrix} d_{23} & d_{25} \\ d_{53} & d_{55} \end{vmatrix} = 0$$
(6)

方程(6)即为周向导波的传播方程。

2 高压电缆铝护套超声导波检测有限元仿真

2.1 高压电缆铝护套建模

本文采用 Abaqus 软件进行有限元仿真,研究超 声导波激励信号在高压电缆铝护套的传播路径和腐 蚀缺陷检测的可行性。将高压电缆铝护套的螺纹管结 构简化为波纹管结构,便于后面的建模和网格划分, 模型如图 2 所示。高压电缆铝护套建模参数从实物测 量得到,参数如表1所示。为了模拟缺陷,在高压电缆铝护套表面切一个直径为10mm,深度为1mm的圆形槽,且距离激励处为255mm,如图3所示。



图 2 高压电缆铝护套简化三维模型

表1 高压电缆铝护套参数

参数 名称	密度/ (kg·m ⁻³)	杨氏 模量/ GPa	泊松 比	最大 外径/ mm	最小 内径/ mm	壁厚/ mm	节距/ mm
参数值	2 700	70	0.33	100	70	3	30



图 3 腐蚀缺陷设置

网格划分是有限元仿真的重要部分。划分的网格 尺寸越小,对模型的描述越精确,但会大幅度增加内 存、硬盘等硬件要求和计算时间。在超声导波仿真中, 为使仿真能够真实有效地模拟导波传播,划分的网格 尺寸 Δ*d* 与声波波长 λ 需要满足公式(7)、公式(8)。

$$\Delta d < \frac{\lambda_{\min}}{10} \tag{7}$$

$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{8}$$

由于激励频率不同,网格划分大小也会相应地改 变。此时导波理论波速为3120 m/s,频率设为500 kHz 代入公式(8)得到λ_{min}=6.3 mm,因此仿真中的网格尺 寸应满足Δd<0.63 mm。考虑到模型几何准确性和网 格精确划分,设置网格大小为0.5 mm,对600 mm 长 的高压电缆铝护套模型进行网格化。高压电缆铝护套 的外壁结构复杂,无法使用常用的六面体单元网格,

2022年第43卷第4期自动化与信息工程3

因此采用四面体单元网格对高压电缆铝护套模型进行自由网格划分。仿真计算采用 Abaqus/Explicit 显式积分求解器。铝的主要模态导波速度约为3120m/s,根据铝护套长度,将分析时间长度设置为0.0001,仿真步长为自动,场输出的时间增量步为0.1 µs,相当于用10 MHz 采样率进行仿真输出。载荷施加在高压电缆铝护套的一个端面,分别采用周向加载、轴向加载的方式。载荷强度采用经 Hanning 窗调制的10个振荡周期的正弦波,其中心频率设置为1 MHz。载荷强度在加载面内均匀分布,边界条件自由。

2.2 仿真结果分析

对不同激励方式的导波检测进行分析,高压电缆 铝护套中 1 MHz 的周向导波腐蚀缺陷检测仿真结果 如图 4 所示。



由图4可清晰看到导波在高压电缆铝护套传播过

程中的始波、端面回波及遇到腐蚀缺陷时接收的缺陷 回波信号,且杂波包较少。波速计算公式为

$$c = \frac{2L}{\Delta t} \tag{9}$$

式中:

L——激励端到缺陷处的距离;

Δ*t*——接收到缺陷回波信号的时间与始波的时间差。

此时 Δt 为 0.167 ms, 通过公式(9)可得到此时的 波速为 3 054 m/s, 周向导波在 1 MHz 下的理论速度 为 3 120 m/s,误差为 2.1%,表明此时在管道中传播 的是周向导波,且结果中的缺陷回波信号确定的位置 为腐蚀缺陷所在处; 1 MHz 的周向导波能够准确地获 得高压电缆铝护套腐蚀缺陷位置。

高压电缆铝护套中 1 MHz 的轴向超声导波腐蚀 缺陷检测仿真结果如图 5 所示。



由图5可知:缺陷位置处出现较明显的突出波包; 相比 1 MHz 周向导波的仿真结果,轴向导波在仿真 过程中出现许多杂波包,且接收波形信噪比较小,缺 陷回波不易分辨。

此时 Δt 为 0.149 ms, 通过公式(9)可以得到波速 为 3 424 m/s, 轴向导波在 1 MHz 下的理论速度为 3 800 m/s, 误差为 9.8%, 理论波速与实际波速相差较 大,得到的缺陷位置与实际缺陷位置有较大差距。其 原因可能为轴向导波在高压电缆铝护套腐蚀缺陷检 测的过程中,群速度随频率变化较大,出现较为明显 的频散现象,使实际波速与理论波速差距较大。同时, 这种频散现象导致的模态转换,使接收波形出现了许 多不应出现的波包,影响高压电缆铝护套腐蚀缺陷检 测的准确度。

图 4 和图 5 的仿真结果表明,在高压电缆铝护套 腐蚀缺陷检测方面,周向导波相较于轴向导波更具优 势,能得到清晰的缺陷信号,获得更准确的缺陷位置。

激励信号的频率是影响周向导波检测激励接收效果和缺陷识别效果的重要参数。采用激励信号为500 kHz 和 1.5 MHz 的周向导波与图 4 中激励信号为1 MHz 的周向导波进行比较。高压电缆铝护套中500 kHz 的周向导波腐蚀缺陷检测仿真结果如图 6 所示。



(a) 500 kHz 周向导波无缺陷信号



由图 6 可以清晰地看到腐蚀缺陷的位置,且杂波 包较少。此时 Δt 为 0.149 ms,通过计算得到波速为 3 355 m/s,与理论波速 3 120 m/s 的误差为 7.5%,与 图 4 中激励信号为 1 MHz 的周向导波进行比较, 500 kHz 时的理论波速与实际波速相差较大,其缺陷 位置检测的准确度降低。其原因为当导波频率较低时, 导波模态较为单一,产生的杂波包较少;同时,超声 导波检测准确度随导波频率的增加而提高,故频率较 低时,实际波速与理论波速相差较大。

高压电缆铝护套中1.5 MHz的周向导波腐蚀缺陷 检测仿真结果如图7所示。



(a) 1.5 MHz 周向导波无缺陷信号

2022年第43卷第4期自动化与信息工程 5



图 7 1.5 MHz 周向导波仿真信号

由图 7 可看到缺陷回波。此时 Δt 为 0.162 ms, 通 过计算可得到波速为 3 148 m/s, 与理论波速 3 120 m/s 的误差为 1%,误差相对于图 4 中 1 MHz 的仿真结果 更小,缺陷位置检测准确度更高。但在仿真过程中出 现许多杂波包,且回波信噪比较小,使缺陷回波不易 分辨。其原因为超声导波检测准确度随导波频率的增 加而提高,故频率较高时,实际波速与理论波速相差 较小,对缺陷位置的检测准确度更高。但频率越高, 导波的模态也增多,产生频散现象,造成杂波包较多, 增加检测难度。

根据上述分析,可得到周向超声导波在高压电缆 铝护套腐蚀缺陷检测中的特点:1)在500kHz~1MHz 的较宽频率范围内,能够得到更清晰的缺陷信号;2) 周向导波在螺纹管结构中的传播更符合其结构特征, 使导波在传播过程中的能量损耗较少;3)当周向导 波频率较低时,虽然能够激励出较为干净的周向导波, 但缺陷位置的检测准确度降低;同时,当周向导波频 率较高时,缺陷位置的检测准确度会提高,但回波信 嗓比较小而难以分辨缺陷回波,故选择适当的导波激 励频率是准确检测的关键。

3 结论

通过上述模型的仿真过程,基于高压电缆铝护套 螺纹管结构几何特征,可以看出利用 Abaqus 有限元 仿真软件可精准获得高压电缆铝护套超声导波模型。 通过对模型施加周向载荷的方式模拟激励出周向导 波。仿真结果表明:周向导波相较于轴向导波在检测 高压电缆铝护套腐蚀缺陷方面更有优势,能够得到清 晰的缺陷信号和更准确的缺陷位置;同时激励信号为 1 MHz 时的周向导波相较于 500 kHz 和 1.5 MHz 时的 检测效果更好,为后续损伤检测提供重要依据。

参考文献

- 祁宏昌,刘远,黄嘉盛,等.基于超声 Lamb 波的高压电缆瓷套 式终端液位检测[J].中国测试,2018,44(12):101-106.
- [2] 黄宇,尹毅,吴长顺.高压电缆阻水缓冲层电性能研究[J].电线 电缆,2018(6):6-9,19.
- [3] 来立永.输电电缆故障树的建立及典型故障分析[D].广州:华 南理工大学,2014.
- [4] 陈云.高压 XLPE 电缆缓冲层故障特征与机理[D].广州:华南 理工大学,2019.
- [5] 马官兵,张俊,李明,等.无损检测可靠性的研究进展[J].中国 电力,2012,45(6):64-69.
- [6] DENG H, HE Z, CHEN L. Ultrasonic guided wave-based detection of composite insulator debonding[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017,24(6):3586-3593.
- [7] 门平,董世运,康学良,等.材料早期损伤的非线性超声诊断[J]. 仪器仪表学报,2017,38(5):1101-1118.
- [8] 朱龙翔,赵时,王悦民,等.含弯头管道超声导波检测[J].中南 大学学报(自然科学版),2020,51(10):2844-2854.
- [9] WILCOX P, LOWE M, CAWLEY P. The effect of dispersion on long-range inspection using ultrasonic guided waves[J]. NDT & E International, 2001,34(1):1-9.
- [10] ICHCHOU M N, AKROUT S, MENCIK J M. Guided waves group and energy velocities via finite elements[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007,305(4-5):931-944.

作者简介:

李濛, 男, 1993, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 高压电缆运维及检修。E-mail: 502509705@qq.com 洪晓丰, 男, 1989, 本科, 工程师, 主要研究方向: 高压电缆附件中超声导波的传播特性。E-mail: 175290455@qq.com 黄嘉盛, 男, 1985, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向: 电力电缆运维检测技术。E-mail: genius223344@126.com