

输电铁塔地脚螺栓腐蚀超声导波检测技术研究

马君鹏¹,王永强²,岳贤强¹,李鸿泽²,刘叙笔¹,李羽可³

(1. 江苏方天电力技术有限公司,江苏 南京 211102; 2. 国网江苏省电力有限公司,江苏 南京 210008;

3. 武汉中科创新技术股份有限公司,湖北 武汉 430000)

摘 要:提出利用钢杆超声柱面导波技术对地脚螺栓进行检测的方法。介绍柱面超声导波的频散特性,制作含有不同深度缺陷的地脚螺栓模拟试样,采用相控阵超声柱面导波技术对模拟试样进行检测,分析不同频率探头和混凝土包裹情况对检测结果的影响,建立地脚螺栓的腐蚀损伤评价体系,实现了在役输电线路铁塔埋地地脚螺栓不开挖条件下对其腐蚀状况的检测。

关键词:地脚螺栓;超声导波检测;混凝土

中图分类号:TB55 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)05-0196-04

Research on Ultrasonic Guidance Testing Method for Corrosive Wear of Anchor Bolts of Transmission Towers

MA Junpeng¹, WANG Yongqiang², YUE Xianqiang¹, LI Hongze², LIU Xubi¹, LI Yuke³

(1. Jiangsu Frontier Electric Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power CO., Ltd., Nanjing 210008, China; 3. Wuhan Zhongke Innovation Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: This paper presents a method of testing anchor bolts by ultrasonic cylindrical guidance technology, introduces its characteristics and makes the simulated samples with different depth defects. The simulated samples are tested by phased array ultrasonic cylindrical guidance technology. The influence of probes for different frequencies and concrete wrapping on the test results is analyzed. The evaluation system for the corrosion damage of the anchor bolts is established, which can be used for the detection of the corrosive wear of the buried anchor bolts for the transmission line towers.

Keywords: anchor bolt; ultrasonic guidance detection; concrete

0 引言

输电线路因铁塔地脚螺栓锚杆断裂而引起的电力系统事故时有发生,常常带来巨大的经济损失。由于在役输电线路铁塔地脚螺栓深埋于混凝土基座里,如因混凝土开裂浸水导致地脚螺栓发生腐蚀,且腐蚀严重状况无法及时发现,会导致腐蚀程度不断加剧进而引发断裂风险。据资料显示地脚螺栓腐蚀损伤无法及时发现往往是地脚螺栓锚杆断裂进而引发事故的主要原因^[1-2]。同时,地脚螺栓腐蚀缺陷具有很强的隐蔽性,常规检测方法需要通过开挖进行,成本高、效率低。因此,研究在役输电线路铁塔地脚螺栓在不开挖情况下腐蚀状态检测评估技术十分必要,能够确保及早发现地脚螺栓腐蚀缺陷、评估危害程度、采取相应防护措施,避免输电线路事故发生,减少停电时间和开挖维修造成的损失,具有重要的经济价值和社会意义^[3]。

目前对锚固体体系的无损检测研究大多限于声频应力波法,还处于探索阶段,所得测试波形杂乱,难以识别判断。而利用超声导波技术对锚杆进行检测则成为了近年来一个新的研究方向^[4]。国外,NAWB和KUNDUT利

用弯曲柱面导波评估混凝土钢筋界面脱粘情况^[5]。BEARDMD等应用超声导波方法对矿山锚杆的完整性无损检测进行了初步的试验与理论研究,并取得了一定的进展,验证了利用超声导波对锚杆检测的可能性,但仅限于实验室研究阶段^[6]。VIENS M研究了扭转模态在无限大介质中杆的传播特性并进行了理论分析,但没有进行试验验证^[7]。国内,何存富等研究了低频导波在埋地锚杆中的传播特性,而应用高频纵向轴对称超声导波对埋于无限大介质中杆的传播特性研究还鲜见报道^[8]。吴斌等对低频的L(0,1)模态在钢杆中的传播特性进行了研究,而对于埋入介质中的杆结构,由于超声导波在其中的频散特性较为复杂,且结构中导波的衰减较大,很难获得有效的信号,因而一直是研究的难点^[9]。

相控阵作为无损检测的热门技术,可用于原材料、焊接接头、连杆、螺栓等工件的快速检测^[10],本文基于超声导波理论及相控阵延时聚焦技术,实现了在役地脚螺栓相控阵超声导波检测。

1 检测原理

超声波在钢杆中实际上是以导波的形式传播,即超声

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2018012)

第一作者简介:马君鹏(1979—),男,吉林吉林人,高级工程师(教授级),本科,研究方向为无损检测。

柱面导波 (cylindrically guided wave technique, CGWT)。钢杆作为波导介质在传播超声导波时,回波信号中包含传播过程中的全部信息,因此可利用导波的这种特性来进行地脚螺栓的腐蚀检测。

超声波在板、杆及空心圆柱壳等波导中传播时,由于受其边界的作用来回反射形成导波。要在介质中形成导波,要求介质某一方向尺寸很小,如杆的直径、板的板厚、管的壁厚等。导波在地脚螺栓中传播时无声波能量泄漏,因此钢杆导波的群速度与能量速度相等。可以根据缺陷回波的时间对其进行定位。本文将地脚螺栓近似为钢杆,在此基础上进行其腐蚀损伤的导波检测研究。

2 钢杆中的超声柱面导波的频散特性

杆状波导中传播的超声波具有多模态和频散特征。通过求解频率方程可以得到导波各个模态的相速度和群速度,相速度曲线和群速度曲线见图 1 和图 2。

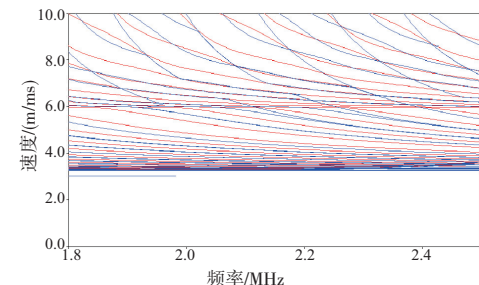


图 1 相速度曲线

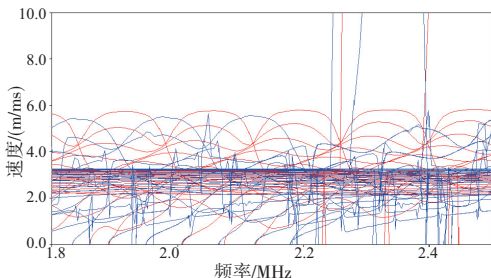


图 2 群速度曲线

图 1 中给出了超声导波纵向轴对称模态分布,曲线图表明当频率较高时模态分布较复杂,每个频率都对应多个模态,各个模态均有各自的截止频率。图 2 表明各模态均存在衰减极小值,低频模态有较大衰减,高阶模态对应某些特定频率时衰减较小,这些特定频率可以作为选择检测频率的依据。衰减极小值对应的频率呈等间距分布规律。

对比图 1 和图 2 发现二者有很好的对应关系,相速度模态最快的区域对应着群速度模态衰减值极小区域。由于这个模态速度最快,因此易区分于其他模态,该模态可用于缺陷检测。

频散曲线反映出在地脚螺栓中存在多个高阶纵向轴对称模态,且存在着具有轴向位移集中在杆体内部、衰减值达到最小的某一特定频率,该频率对应的模态可以传播

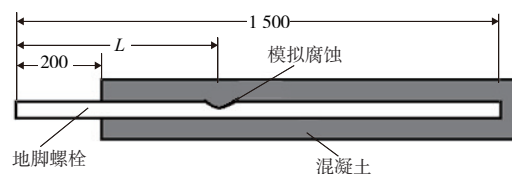
很远的距离,因此,检测地脚螺栓时可以选择衰减极小值频率对应的模态来进行。

3 地脚螺栓检测试验与分析

基于超声波检测基础以及相控阵延时聚焦技术,针对地脚螺栓中不同位置的缺陷进行试验,为实现在役地脚螺栓相控阵超声导波检测提供实验基础。

3.1 模拟试样制备

为了确定地脚螺栓缺陷检测灵敏度及缺陷定量定位,本实验根据螺栓规格、型号以及材质,制备地脚螺栓模拟试样,具体尺寸以及缺陷尺寸如图 3(a)所示,本实验使用混凝土将地脚螺栓包裹,模拟地脚螺栓在地下被混凝土固定包裹的现场检测条件,地脚螺栓规格为 M42×1 500 mm,人工模拟腐蚀缺陷试样如图 3(b)所示。不同深度缺陷对应的地脚螺栓腐蚀缺失率见表 1,分别选取缺陷深度为 4 mm、5 mm、7 mm 对应腐蚀缺失率为 4.84%、6.72%、10.96%的人工模拟腐蚀缺陷加工制备模拟试样,缺陷距离检测端面距离 L 分别为 500 mm、800 mm、1 200 mm。



(a) 混凝土包裹地脚螺栓示意图



(b) 混凝土包裹模拟试样实物图

图 3 螺栓模拟试样图

表 1 M42 mm 地脚螺栓不同深度缺陷腐蚀缺失率

缺陷深 h/mm	腐蚀面积 $\Delta S/\text{mm}^2$	截面积 S/mm^2	腐蚀缺失率 $\frac{\Delta S}{S}/\%$
1	8.57	1 385.5	0.62
2	24.08	1 385.5	1.74
3	43.92	1 385.5	3.17
4	67.11	1 385.5	4.84
5	93.08	1 385.5	6.72
6	121.41	1 385.5	8.76
7	151.78	1 385.5	10.96

3.2 试验设备

试验所用的检测系统为定向研发的“输电线路铁塔地脚螺栓检测仪”,如图 4 所示。输电线路铁塔地脚螺栓

腐蚀专用相控阵检测仪具有如下特点:

- 1) 对 16/64 一维圆形平面线阵探头实行循环线扫描,无需转动和移动探头;
- 2) 适用于 M20 mm~M100 mm 地脚螺栓全规格尺寸范围;
- 3) 具备螺栓实体模型 CAD 导入仿真功能、工件结构模拟功能,缺陷检测结果直接在 B 扫描图像上进行,缺陷显示直观;
- 4) 可实现全程动态聚焦,将探头放置于螺栓外露端面后可在短时间内完成地脚螺栓整体检测,检测效率高;
- 5) 开放式软件环境,可实现专用软件的开发和植入;
- 6) 流程化操作模式,易学易用。

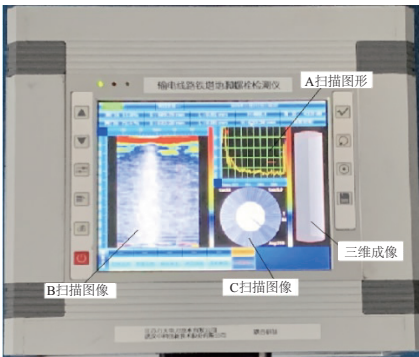


图 4 检测仪器

3.3 专用检测探头设计

针对输电线路铁塔地脚螺栓这一特定检测对象,综合现场大量螺栓检测效率需求和检测可靠性需求,选用一维圆形平面线阵形式设计制作专用检测探头,如图 5 所示。

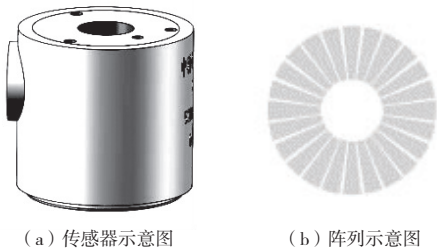


图 5 一维圆形平面线阵列传感器

专用探头具有如下特点:

- 1) 探头采用一维圆形平面线阵设计,能够更好适用于螺栓、棒材等圆柱状试件检测;
- 2) 探头采用多阵元设计,例如 32、64 阵元等,能够较好配合相控阵设备电子扫描技术提高检测效率和覆盖率,并可根据需求定制不同尺寸及阵元数,以便适用于地脚螺栓全规格尺寸范围的检测需求;
- 3) 探头设计有中心通孔,能够加装定位销装置,确保探头与螺栓端面耦合良好;
- 4) 探头外壳设计有螺纹,可加装耐磨装置,避免探头直接和试件接触,延长探头使用寿命;
- 5) 探头采用电缆线在侧向引出设计,符合人体工程学原理,方便手持探头实施检测。

设计制作的系列地脚螺栓专用检测探头参数见表 2。

表 2 检测所用传感器参数

型号	频率/MHz	阵元数	内径/mm	外径/mm
5c64-18×38	5.00	64	18	38
3.5c64-18×38	3.50	64	18	38
2.25c64-18×38	2.25	64	18	38

3.4 试验与分析

1) 混凝土包覆的影响

采用 2.25 MHz、3.5 MHz 及 5 MHz 3 种不同频率的探头分别对 M46×1 600 mm 地脚螺栓模拟试样距离端头 500 mm 处深 6 mm 的模拟腐蚀缺陷于混凝土包覆前后进行检测,固定扫查增益为 37dB,检测结果见表 3。上述检测过程中,草状波波高约为 18%,2.25 MHz 探头混凝土包覆后检测结果如图 6 所示,图中圆圈分别标识出了缺陷信号在 B 扫图像、三维立体模型中的成像结果及 A 扫描波形。由表 3 数据分析,包裹混凝土前后相同检测系统缺陷回波幅度仅相差约 1 dB,因此是否包裹混凝土对地脚螺栓腐蚀缺陷检出效果没有明显影响,均可获得较好信噪比的检测结果,验证了该方法的有效性。

表 3 不同频率探头混凝土包覆前后的检测结果

探头频率/MHz	包覆状态	缺陷波高/%	定位距离/mm
2.25	无	32.9	562.3
3.50	无	40.8	527.8
5.00	无	40.8	558.1
2.25	包覆	36.9	558.7
3.50	包覆	46.3	547.6
5.00	包覆	46.3	557.4

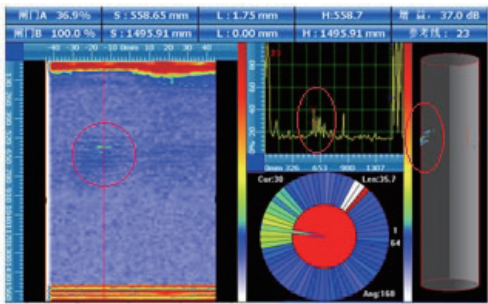


图 6 2.25 MHz 频率下混凝土包覆地脚螺栓的缺陷检测结果

2) 探头频率的影响

针对上述试验结果,由表 3 数据分析可知,对于相同反射距离的相同截面缺失率腐蚀缺陷,较高频率探头的检测波高会略大于较低频率探头的检测波高,因此在保证检测能量的前提下建议采用较高频率的探头进行检测以便获得更好的回波信号。

3) 定位误差

针对上述试验结果,由表 3 数据可以看出,采用不同频率的探头检测对缺陷的定位均会存在一定误差,该误差

的产生是由于导波本身的多模态传播特性造成的,因地脚螺栓腐蚀检测最关心的是腐蚀缺陷的截面积缺失率,一定程度的定位误差对于检测来讲是可接受的。

4) 灵敏度确定

对于深度分别为 4 mm、5 mm、7 mm 的不同腐蚀缺失率的模拟缺陷进行检测,将系列检测数据通过线性拟合公式($y=ax+b$)进行拟合后得到增益值随距离远近的变化曲线,如图 7 所示。这些曲线可以近似描述缺陷位置、回波增益和缺陷当量尺寸之间的关系,可以依此建立地脚螺栓的腐蚀损伤评价体系。

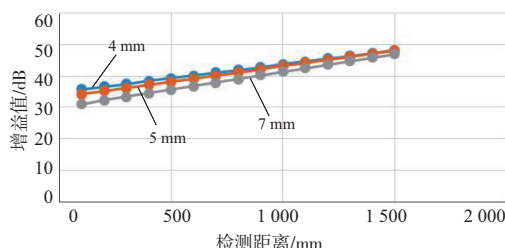


图 7 M42 mm 螺栓增益值随着距离变化曲线图

由图 7 可以看出每个不同腐蚀缺失率模拟缺陷的距离增益曲线均可近似看成是线性的。在此基础上,可通过在地脚螺栓模拟试样上所需检测最远处设置最小允许缺陷,调整仪器增益使该缺陷回波高度处于 80%,并以此增益作为检测灵敏度。在实际检测中,以该方法设置检测灵敏度对未知缺陷进行检测时,可检测出整根地脚螺栓上大于最小允许缺陷当量的缺陷,并根据上述距离增益曲线得到相应腐蚀缺陷当量,进而估算腐蚀缺失率。

4 结语

本文从理论上分析了柱面超声导波的频散特性,制作了不同深度缺陷的地脚螺栓模拟试样,采用相控阵超声柱面导波技术对模拟试样进行检测,分析了混凝土包覆和探头频率对检测结果的影响,并建立地脚螺栓的腐蚀损伤评价体系,得出以下结论:

1) 可以选用衰减极小值频率对应的导波模态来检测地脚螺栓。

2) 混凝土包裹对地脚螺栓检测效果没有明显影响,表明该检测方法可适用于埋地地脚螺栓不开挖条件下的现场检测。

3) 实际检测中,可根据距离-增益变化曲线确定缺陷当量,用于评估地脚螺栓腐蚀损伤量。

相控阵超声柱面导波技术检测螺栓具有操作简单、结果直观、可重复性好、现场检测人员要求低等优点,该技术还可应用于其他行业类似螺栓的检测。

参考文献:

- [1] 张成涛,刘宗林,唐小辉,等. 输电铁塔的腐蚀与防护[J]. 全面腐蚀控制,1998,12(3):11-15.
- [2] 王秀玉,朱德补,程学启. 对运行输电线路铁塔防腐问题的探讨[J]. 山东电力技术,2006(6):55-57.
- [3] 默增禄,程志云. 输电线路杆塔的腐蚀与防治对策[J]. 电力建设,2004,25(1):22-23,36.
- [4] 周正干,冯海伟. 超声导波检测技术的研究进展[J]. 无损检测,2006(2):57-63.
- [5] NA W B, KUNDU T. Inspection of interfaces between corroded steel bars and concrete using the combination of a piezoelectric zirconate-titanate transducer and an electromagnetic acoustic transducer[J]. Experimental Mechanics, 2003, 43(1):24-31.
- [6] BEARD M D, LOWE M J S, CAWLEY P. Development of a guided wave inspection technique for rock bolts[J]. Aip Conference Proceedings, 2002,615(1):1318.
- [7] VIENS M. Leaky torsional acoustic modes in infinite clad rods[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1994, 95(2):701-707.
- [8] 何存富,吴斌. 超声柱面导波技术及其应用研究进展[J]. 力学进展,2001,31(2):203-214.
- [9] 吴斌,张瑞芳,刘秀成,等. 基于纵向模式超声导波陷频特性的钢绞线拉力测量新方法[J]. 机械工程学报,2016(12):9-15.
- [10] 滕德金,王东方,滕德巧. 基于超声相控阵检测技术的连杆检测方法研究[J]. 机械制造与自动化,2018,47(6):198-202.

收稿日期:2020-07-15

(上接第 195 页)

参考文献:

- [1] 周汝胜,焦宗夏,王少萍. 液压系统故障诊断技术的研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报,2006(9):6-14.
- [2] 郑永梅,叶宏飞,汪小飞,等. 飞机液压系统故障诊断的现状与发展趋势[C]. 航空试验测试技术学术交流会论文集,北京:中国航空学会,2016:4.
- [3] 窦丹丹,姜洪开,何毅娜. 基于信息熵和 SVM 多分类的飞机液压系统故障诊断[J]. 西北工业大学学报,2012,30(4):529-534.
- [4] 刘泽华,李振水. 基于小波包特征熵的飞机液压系统故障诊断方法研究[J]. 计算机测量与控制,2009,17(9):1705-1707,1710.
- [5] 李耀华,王星州. 飞机液压系统故障诊断[J]. 计算机工程与应用,2019,55(5):232-236,264.
- [6] LECUN Y, BOTTOU L, BENGIO Y, et al. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition[J]. Neural

Computation, 1989, 11(4):541-551.

- [7] 孙志远,鲁成祥,史忠植,等. 深度学习研究与进展[J]. 计算机科学,2016,43(2):1-8.
- [8] 周志华. 机器学习[M]. 北京:清华大学出版社,2016:33-34.
- [9] 方匡南,吴见彬,朱建平,等. 随机森林方法研究综述[J]. 统计与信息论坛,2011,26(3):32-38.
- [10] BURGESS J C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition[J]. Data Mining and Knowledge discovery, 1998, 2(2):121-167.
- [11] 徐慧丽. Stacking 算法的研究及改进[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- [12] 王海涛. 飞机液压元件与系统[M]. 北京:国防工业出版社,2012:190-196.

收稿日期:2019-07-02