

地脚螺栓相控阵柱面超声导波换能器的设计及应用

岳贤强¹,姜海波²,高超²,马君鹏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:设计了一种用于地脚螺栓缺陷检测及腐蚀评估的相控阵超声导波换能器,通过对换能器阵列型式、阵元个数、频率、晶片尺寸的合理设计,可以有效避免螺纹反射回波的干扰,提高信噪比和缺陷检测结果的可靠性,并通过检测案例进行了验证。

关键词:换能器;地脚螺栓;柱面超声导波技术;相控阵

中图分类号:TP202 **文献标识码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)01-0093-03

Phased Array Ultrasonic Cylindrically Guided Wave Transducer for Detecting the Anchor Bolts

YUE Xianqiang¹, JIANG Haibo², GAO Chao², MA Junpeng¹, 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: A phased array ultrasonic guided wave transducer were designed for the defect testing and corrosion wastage evaluation of anchor bolts and other buried anchor bolt systems. By rational designing the transducer array type, number of array elements and frequency and chip size, it is effective in avoiding the interference of thread reflection signals and improving the signal-to-noise ratio and reliability of defect detection results, which has been verified by the experiment.

Keywords: transducer; anchor bolt; cylindrically guided wave technique; phased array

0 引言

地脚螺栓是电力输电线路铁塔的重要基础部分,埋藏在混凝土基础中。在长期服役过程中,地脚螺栓在各种腐蚀介质作用下发生电化学腐蚀,造成受力截面减小,承载力下降,对输电线路铁塔安全稳定造成威胁,易发生倒塔事故^[1-2]。

对于地脚螺栓等细长杆体,可以采用柱面超声导波技术(cylindrically guided wave technique, CGWT)进行缺陷检测和腐蚀量测量^[3-5]。超声波在细长螺栓中传播时声束与侧壁干涉发生波型转换,其反射回波信号包含了杆件的整体信息,从而实现对缺陷及腐蚀缺失的检测评估。CGWT技术最早用于螺栓、阀杆、泵轴等具有较大长径比构件的缺陷检测和评估^[6]。由于技术限制,此种方法存在一些不足,如螺纹反射回波的干扰、信噪比低、机械扫查困难、检测效率低等。

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^[7-8]。本文结合超声柱导波和相控阵延时技术,设计一种适合地脚螺栓等大尺寸杆件无损检测的相控阵超声柱导波换能器,并制作换

能器用于实际检测,验证其可靠性,有效解决了地脚螺栓腐蚀缺陷检测难题。

1 用于螺栓检测的柱导波原理

波导原理可有效地应用于细长圆柱体(如螺栓、双头螺杆、阀杆或泵轴)的超声检测。当超声束沿圆柱体轴向传播时,由于纵波声束与圆柱侧壁发生掠射的交互作用引起系列的波型转换,即纵波(L)掠射至螺栓侧壁波型转换成横波(S),横波传播至对面侧壁转换为掠射纵波($L-S-L$),在长度大于直径的细长圆柱体中此种转换可发生多次。这种波型转换就是柱导波技术检测螺栓中缺陷的物理基础。

为了查明波型转换(两次转换或三次转换)信号的存在,转换波的信号必须能与主反射脉冲分开。分开的程度与入射脉冲宽度及被检圆柱波导的直径有关。图1所示是一个发生多重波型转换的情况。第1个回波信号是来自螺栓另一端的底波,紧接着底波的信号是经波形转换后的拖尾脉冲信号。底波信号(直射纵波)与第1个拖尾脉冲信号之间的时间间隔与螺栓的直径有关,且拖尾信号之间的时间间隔均相等。

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技资助项目(J2018012)

第一作者简介:岳贤强(1991—),男,山东济宁人,工程师,硕士,研究方向为无损检测。

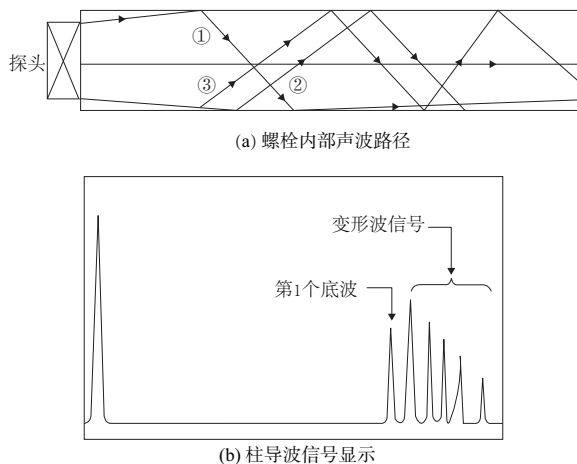


图1 柱导波技术示意图

底波信号为直射纵波反射信号(L),第1个拖尾脉冲信号发生了一次纵波-横波-纵波转换($L-S-L$);第2个拖尾信号则完成了两次波型转换($L-S-L-S-L$)。底波和第1个拖尾脉冲之间的时间间隔 Δt 是以横波速度行进距离 S 所需的时间减去以纵波速度行进 X 所需的时间(图2所示),其时间差为

$$\Delta t = \frac{d(C_L^2 - C_S^2)^{1/2}}{C_L C_S}$$

式中: d 为螺栓直径,mm; C_S 为钢中横波速度,m/s; C_L 为钢中纵波速度,m/s。

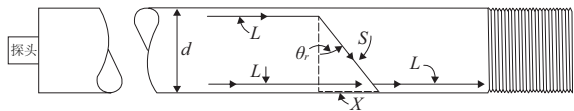


图2 直射纵波与经波型转换的拖尾信号之间的声程差

2 换能器设计

2.1 换能器阵列形式

地脚螺栓超声检测声源只能端面加载,不需要偏转声束及顺次移动阵列激励即可实现对螺栓全方位扫描。选择的换能器阵列形式为一维平面圆形线阵,见图3。条形阵元沿径向均匀分布在半径为 r 和外径为 R 的圆环面积上。该形式换能器具有以下特点:

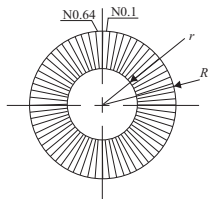


图3 一维平面圆形线阵

1) 发射的超声纵波能够与螺栓侧壁形成很好的掠射关系,可实现柱导波检测;

2) 沿圆弧线顺次移动阵列激励对螺栓实施循环电子

扫描,探头不需要机械移动扫描,检测效率高;

3) 阵列信号进行实时运算处理,检测信噪比远高于单一探头检测。

2.2 换能器阵元个数

随着相控阵阵元个数的增加,主瓣宽度 $\Delta\theta$ 减小,超声波束的聚焦效果越好,图像分辨力越高。取 $\theta_0 = 0^\circ$, $\lambda = 2d$,经计算得到阵元个数 n 与主瓣宽度 $\Delta\theta$ 的关系如图4所示。主瓣宽度随阵元个数的增加而减少,而且减少的趋势越来越缓。阵元数在0~16之间主瓣宽度迅速变小;在阵元数达到16个以后,阵元的增加对减小主瓣宽度的作用不大。为保证换能器具有足够发射能量和较高精度,得到更好的检测效果,最终确定用64个阵元进行检测。

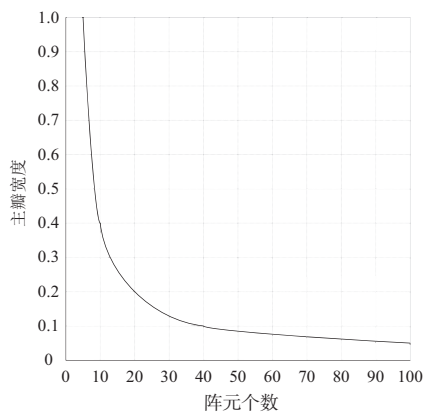


图4 阵元个数与主瓣宽度的关系

2.3 换能器阵列几何参数

为了达到最优的检测效果,不同尺寸的地脚螺栓应选择不同几何参数的阵列。一般将圆形线阵的外半径 R 设置为比待检测地脚螺栓的公称半径小2mm。单个条形阵元的长度 L 即为圆形线阵的内外径之差。所以在确定圆形线阵的外径以及条形阵元的长度后,即可得到圆形线阵的内半径 r ,即 $r = R - L$,如图5所示。

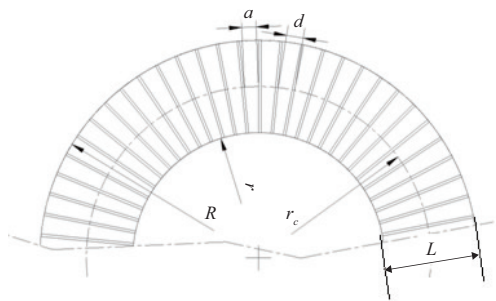


图5 一维平面圆形线阵几何模型

圆形线阵结构中 d 为相邻阵元的间距, a 为条形阵元宽度, d 和 a 的确定以中性圆半径 r_c 为基准: $r_c = r + (R - r)/2$ 。阵元宽度和阵元间距会影响波束指向性和旁瓣幅值,是影响换能器性能的重要指标^[9-10],在设计 and 制作过程中要综合考虑实用性、加工难度和经济性。

2.4 条形阵元长度和螺纹波抑制

在未扩散区内,声束不扩散,近似垂直于晶片沿螺栓轴向传播,不存在地脚螺栓的螺纹反射波。当声束开始扩散时,若声束垂直入射螺纹倾斜面,晶片会收到强烈的螺纹反射信号,降低信噪比。

螺纹倾斜面标准夹角为 60° ,如图 6 所示。声束扩散时在 F 点反射到达换能器晶片,当单晶片长度小于距离 S 时,换能器晶片不会接收到螺纹反射信号。所以为了避免接收螺纹反射信号,将单晶片长度的最大值设置为 S ,根据三角几何关系可以得到单晶片最大长度为: $S = \sqrt{3}b$,其中, b 为声束未扩散区长度,单晶片长度在此范围内,即可有效抑制螺纹反射信号。

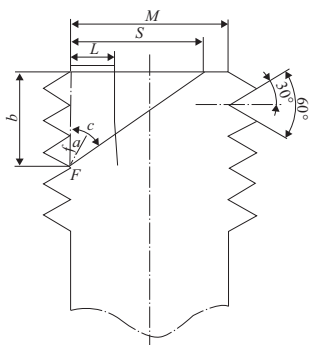


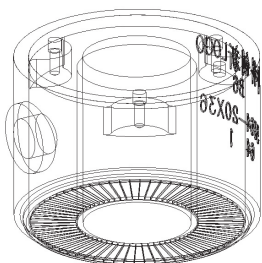
图 6 条形阵元的长度计算示意图

2.5 换能器阵元频率选择

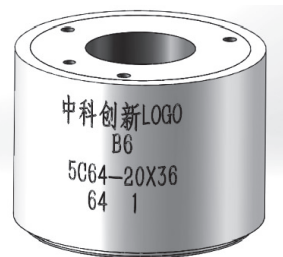
换能器阵元频率选择对检测缺陷的探测能力影响很大。一维圆形线阵频率的选择需要综合考虑地脚螺栓的长度、直径、材料特性以及降低阵列栅瓣等因素。线阵的频率越高,图像的分辨力越高,但频率高会增加栅瓣的数量,不容易对其控制。输电线路铁塔的地脚螺栓长度一般 $\leq 2\ 000$ mm,为避免频率过高引起较大衰减,对于长度 $< 1\ 000$ mm 的地脚螺栓推荐选用 5 MHz 的频率,对于长度 $> 1\ 000$ mm 的地脚螺栓推荐选用 2.25 MHz 的频率。

2.6 换能器的结构设计

换能器的整体几何尺寸按被检测地脚螺栓的要求进行设计。换能器的内部构成与传统典型结构基本一致,设计上采取中空圆环结构,见图 7 所示。在保证换能器性能要求的基础上尽可能地减轻换能器的质量,方便使用,也减少了材料成本。



(a) 一维平面圆形线阵整体设计



(b) 换能器外观

图 7 一维平面圆形线阵整体设计

3 应用案例

3.1 输电线路铁塔地脚螺栓腐蚀检测

针对某 500 kV 输电线路铁塔 $\phi 46 \times 1\ 600$ mm 地脚螺栓,采用 2.25 MHz 12×42 (频率 2.25 MHz、64 阵元、外径 42 mm、内径 12 mm) 规格一维圆形平面线阵换能器,配合定制的地脚螺栓腐蚀状态检测系统进行检测,该地脚螺栓在距离检测端面 600 mm 左右存在一处当量 6 mm 的腐蚀缺陷,如图 8 所示。

从检测结果可以看出螺纹反射波得到了有效消除,缺陷反射信号明显,信噪比高。缺陷位置距检测端面 594.9 mm,与实际情况偏差不到 1%,检测精度很高。这得益于周向电子扫查,可以直接从检测结果中得到缺陷的周向位置,A 扫视图中可以得到缺陷的相对当量,从而实现了对地脚螺栓缺陷的精确定位和定量检测。

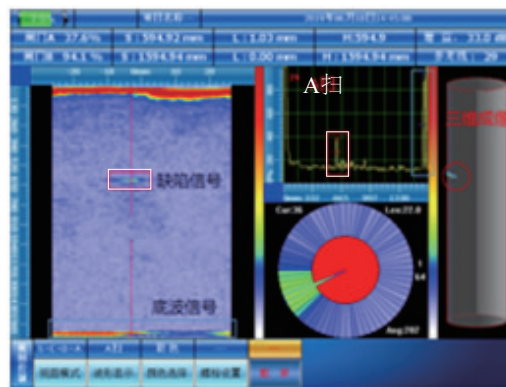


图 8 地脚螺栓检测结果

3.2 双头螺柱缺陷检测

对规格为 M30 $\times$ 420 mm 的双头螺柱进行缺陷检测,其两端螺纹部分长 100 mm。采用 5 MHz 8×26 (频率 5 MHz、64 阵元、外径 26 mm、内径 8 mm) 规格的一维圆形平面线阵换能器,配合定制的地脚螺栓腐蚀状态检测系统进行检测,该螺柱距离探头放置端面 61 mm 处存在 1 mm 线切割槽当量裂纹,检测结果如图 9 所示,裂纹位于螺纹根部,从图中可以看出裂纹信号明显,且没有螺纹信号。

(下转第 119 页)

期目标。

参考文献:

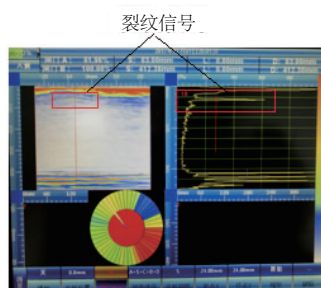
- [1] 新. 直升机数字式航空电子设备和展[J]. 国际航空, 1994(6): 38-39.
- [2] 孟繁鹏. 飞行管理仿真系统设计与分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [3] 王伟志, 徐锦法. 基于 FlightGear 和 RTW 的分布式可视化飞行仿真研究[J]. 江苏航空, 2010(增刊2): 20-23.
- [4] 向明, 马存宝. 基于 VAPS 的 FMS CDU 实时仿真系统开发[J]. 计算机仿真, 2006, 23(8): 244-247.
- [5] 吴丽媛, 王伟. 直升机机电综合管理系统通用仿真设备设计[J]. 直升机技术, 2018(2): 52-54, 59.
- [6] 马锐. 飞行管理系统性能优化与控制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [7] 陈义军. GNS430 综合航空电子设备仿真[J]. 中国民航飞行学院学报, 2019, 30(4): 67-70, 74.
- [8] 裴鑫, 宋奕, 秦银雷. 某型直升机桌面交互式座舱仿真训练系统[C]. 第 14 届中国系统仿真技术及其应用学术年会,

2012.

- [9] 刘瑞挺. 全国计算机等级考试三级教程——网络技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [10] 郑馨睿, 吴庆宪, 叶辉. 歼击机边界保护的动态矩阵控制方法[J]. 电光与控制, 2016, 23(11): 27-32.
- [11] 李杨, 李浩, 陈奇. 典型直升机尾传动轴系动力学建模与临界转速计算方法[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(5): 163-166.
- [12] Aeronautical Radui Inc. ARINCCHARACTERISTI C702A-3[S]. 2006.
- [13] 彭劲松, 秦永元. 大圆航线导航与控制律设计[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(6): 62-66.
- [14] 吴克风. 基于 Dubins 的最优航迹规划方法与火力筹划若干问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [15] 陈子昂, 杏建军, 郑黎明, 等. 无人机导航路径跟踪精确制导仿真研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(10): 26-30.

收稿日期: 2019-12-03

(上接第 95 页)



(a) 双头螺柱检测结果



(b) 螺栓拆卸后验证

图 9 双头螺柱检测

4 结语

本文设计了一种一维平面圆形线阵换能器,并应用于地脚螺栓等细长杆体的缺陷检测和腐蚀减薄评估。与传统单一超声纵波探头检测方法相比,该换能器在检测地脚螺栓方面具有很大的优势,由于采用沿圆弧线顺次移动阵列激励对螺栓实施循环电子扫描,发射的超声纵波能够与螺栓侧壁形成很好的掠射关系,可以有效避免螺纹反射回

波的干扰,信噪比较高,缺陷回波明显,缺陷的定量与定位精度较高,可以有效实现地脚螺栓等埋地锚杆体系的缺陷检测。该换能器可用于轴销、阀杆及泵轴等细长圆柱体工件的超声无损检测。

参考文献:

- [1] 邓小康. 铁塔地脚螺栓及塔脚锈蚀严重的修复加固[J]. 通信电源技术, 2018, 35(1): 165-166.
- [2] 高扬明. 单管塔塔脚地脚螺栓防腐处理工艺[J]. 电信技术, 2019(6): 35-36, 39.
- [3] LIGHT G M, JOSHI N R. Ultrasonic waveguide technique for detection of simulated corrosion wastages[J]. Nondestructive Testing Communications, 1987, 3(1): 13-27.
- [4] 骆国防. 基于超声柱面导波技术对钢杆缺陷的无损检测研究[J]. 东北电力技术, 2019, 40(7): 12-14, 21.
- [5] 鲁珊珊, 吴英思, 刘飞. 杆中导波声弹性效应分析与数值模拟[J]. 应用声学, 2018, 37(4): 469-474.
- [6] THOMPSON D O, CHIMENTI D E. Review of progress in quantitative nondestructive evaluation[M]. Boston, MA: Springer US, 1990.
- [7] 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, 211.
- [8] 王波, 高双胜, 马明. 2024 铝合金薄板搅拌摩擦焊接头缺陷超声无损检测[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(5): 54-56.
- [9] 黄晶, 阙沛文, 金建华. 线形超声相控阵换能器的阵列[J]. 传感器技术, 2004, 23(1): 9-12.
- [10] 姚旭, 郭建中. 线阵阵元间距和宽度对波束指向性的影响[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 46-50.

收稿日期: 2020-07-22