

DOI: 10.19666/j.rlfed.202207121

## 2种在役风机螺栓孔相控阵超声检测方法

赵 仑<sup>1</sup>, 蔡 晖<sup>1</sup>, 王志强<sup>1</sup>, 郝蛟蛟<sup>2</sup>, 王 博<sup>2</sup>, 王 鹏<sup>1</sup>, 秦承鹏<sup>1</sup>, 王博涵<sup>1</sup>  
(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;  
2.华能新能源股份有限公司陕西分公司, 陕西 西安 710054)

[摘 要] 风机装备中存在大量螺栓连接结构, 螺栓孔一旦出现缺陷, 可能导致整个基体断裂, 造成重大事故, 但目前螺栓孔缺陷检测方法存在漏检和误判的情况。针对该问题, 经过调研、理论分析和实物研究, 研制出专用工装与探头结合的直射法、扇扫描偏转法2种螺栓孔缺陷检测方法。以风机变桨轴承螺栓孔为研究对象, 采用CIVA软件对2种检测方法进行模拟, 可检测出矩形模拟裂纹。采用实际变桨轴承螺栓孔加工矩形槽缺陷进行试验, 结果表明直射法可实现对螺栓孔裂纹的缺陷检测。研究为螺栓孔的服役状态监控提出了新的方法, 有利于保证螺栓连接结构的安全服役。

[关 键 词] 螺栓孔; 裂纹; 相控阵超声; 风机; CIVA

[引用本文格式] 赵仑, 蔡晖, 王志强, 等. 2种在役风机螺栓孔相控阵超声检测方法[J]. 热力发电, 2023, 52(3): 67-72.  
ZHAO Lun, CAI Hui, WANG Zhiqiang, et al. Two phased array ultrasonic testing methods for bolt holes of wind turbines in service[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(3): 67-72.

### Two phased array ultrasonic testing methods for bolt holes of wind turbines in service

ZHAO Lun<sup>1</sup>, CAI Hui<sup>1</sup>, WANG Zhiqiang<sup>1</sup>, HAO Jiaojiao<sup>2</sup>, WANG Bo<sup>2</sup>, WANG Peng<sup>1</sup>,  
QIN Chengpeng<sup>1</sup>, WANG Bohan<sup>1</sup>

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Huaneng New Energy Co., Ltd. Shaanxi Branch, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Large number of bolted structures exist in wind turbine equipment, once the bolt hole is defective, it may lead to fracture of the entire matrix and cause major accident, but the current bolt hole defect detection method has the situation of missed detection and misjudgment. Aiming at solving this problem, through investigation, theoretical analysis and physical research, two methods which combine special tooling with probe for bolt hole defect detection are developed, namely the direct beam method and the sector scanning deflection method. Taking the bolt hole of pitch bearing in wind turbine as the research object, the CIVA software is used to simulate the two detection methods, and the rectangular simulated crack can be detected. Experiments were carried out on the defects of rectangular grooves in the actual pitch bearing bolt holes, which showed that the direct beam method could realize the defect detection of bolt hole cracks. The research provides a new method for monitoring the service status of bolt holes, which is beneficial to ensure the safe service of bolted structures.

**Key words:** bolt hole; crack; phased array ultrasound; wind turbine; CIVA

螺栓连接结构是风机装备中的主要机械结构, 其作用是紧固和连接部件<sup>[1]</sup>。为确保连接效果, 连接结构会预留一定的预紧力, 导致螺栓孔附近应力较大<sup>[2]</sup>, 一旦其内壁存在结构缺陷或腐蚀坑等, 极易在螺栓孔处产生裂纹<sup>[3]</sup>。

相比于螺栓孔, 检测人员更关注螺栓的质量<sup>[4]</sup>,

但是螺栓孔内壁一旦产生裂纹并扩展, 可能造成整个基体的断裂, 比单根螺栓断裂产生的后果更严重, 造成的损失更大<sup>[5]</sup>。

我国是全球风电第一大市场, 在“双碳”目标下, 风电在能源行业中占据越来越重要的地位<sup>[6-8]</sup>。风机含有大量螺栓连接结构, 部分螺栓连接结构在承受

收稿日期: 2022-07-08 网络首发日期: 2022-08-24

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52101001)

Supported by: Youth Science Foundation Project of National Natural Science Foundation of China(52101001)

第一作者简介: 赵仑(1995), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电站金属监督, zhaolun@tpri.com.cn。

预紧力的同时还要承受部件旋转的离心力等<sup>[9-10]</sup>, 复杂的应力使得风机在服役时容易萌生缺陷甚至快速扩展产生裂纹以致失效。湖北、内蒙古等多处风场曾发生风机变桨轴承在螺栓孔处断裂导致风机叶片掉落事故<sup>[11-15]</sup>。因此, 检测人员应高度关注风机的螺栓连接结构, 不仅需要定期对螺栓进行无损检测, 而且应对螺栓孔及其附近的基体进行相应的检测, 以保证螺栓连接结构服役的安全性<sup>[11]</sup>。

风机的螺栓连接结构在服役时不便拆卸, 仅在螺栓产生故障后才能进行拆卸更换, 因此受垫片、螺母、空间等影响, 螺栓孔检测无法有效实施。针对该问题, 本文以在役变桨轴承为研究对象, 研究螺栓孔缺陷的检测方法。

由于螺栓孔具有一定深度, 表面检测方法不能满足要求, 只能采用体积检测方法。而传统的体积检测方法中: 涡流检测受提离效应影响, 检测深度有限; 便携射线机的穿透有限, 且检测人员在风机上无法躲避射线辐射; 受变桨轴承结构、所处空间结构、螺栓垫片和螺母的影响, 常规超声探头移动空间有限, 难以实现检测区域的扫查覆盖; 导波检测的检测精度有限<sup>[16]</sup>。相控阵超声检测采用多个晶片发射声束, 可通过不同的延迟激励在不移动或少移动探头的情况下偏转声束, 实现更大范围的检测, 且可以实现三维成像。基于以上优势, 本文着重研究螺栓孔裂纹的相控阵超声检测方法<sup>[17-19]</sup>。为提高研究效率, 首先采用 CIVA 软件结合三维模型进行相控阵超声模拟优选最佳方法和工艺, 然后根据模拟结果在变桨轴承实体上进行试验验证<sup>[20-22]</sup>。

## 1 模拟研究

### 1.1 三维模型搭建

以某 1.5 MW 风机 FD-033.45.1910.03 内齿型变桨轴承(图 1)为研究对象, 其结构如图 2 所示, 相关尺寸见表 1<sup>[23]</sup>。采用三维绘图软件绘制变桨轴承和相控阵超声检测工装的三维模型, 具体如图 3 所示。



图 1 变桨轴承实物

Fig.1 Physical image of the pitch bearing

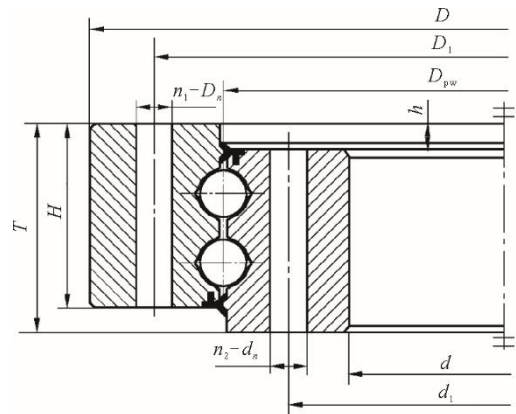


图 2 变桨轴承结构

Fig.2 Structure of the pitch bearing

表 1 FD-033.45.1910.03 型号变桨轴承相关尺寸

Tab.1 Related dimensions of FD-033.45.1910.03 type pitch bearing

外形尺寸/mm			安装孔尺寸/mm			齿轮参数/mm		
$d$	$T$	$h$	$d_1$	$d_n$	$n_2$	$d_a$	$b$	$z$
1 716	175	9	1 800	33	64	1 657.3	100.0	139.0

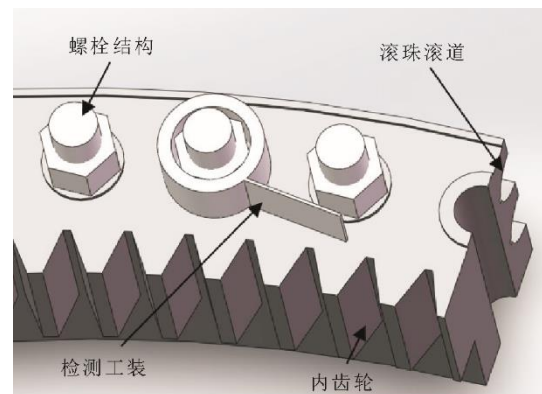


图 3 变桨轴承与检测工装

Fig.3 The pitch bearing and inspection tooling

### 1.2 螺栓孔缺陷与现有检测方法分析

螺栓孔基体缺陷包括夹渣、气孔、砂眼等初始缺陷。在服役过程中, 由腐蚀、应力导致的原始缺陷扩展、疲劳等产生裂纹时有发生, 裂纹一旦产生, 由于螺栓孔结构原因, 将以螺栓孔为中心呈辐射状向四周发散。

目前, 检测人员常采用相控阵超声直接对螺栓孔进行扫查。在检测中, 如果未限制探头方向, 当探头偏离螺栓孔, 可能检测不到螺栓孔附近的缺陷; 当探头方向偏向螺栓孔, 扫查图像上会出现螺栓孔的回波, 增加缺陷判断的难度: 因此直接采用相控阵超声进行检测容易造成漏检或误判。

### 1.3 相控阵超声 CIVA 软件仿真模拟

为了避免传统相控阵超声检测方法在螺栓孔

检测时出现漏检或误判，根据现有检测方法的不足，提出 2 种检测方法进行模拟验证：

1) 对探头加装检测工装限定扫查方向，保证在相控阵超声探头进行扫查时，中心声束处于螺栓孔薄弱处的切面上，以避免漏检和误判；

2) 采用特制楔块使扇形扫查声束偏转，倾斜射向螺栓孔，将螺栓孔壁的反射波作为标志波对缺陷进行判断，其反射波强度将根据声束射向螺栓孔的位置而连续变化，当出现反射波强度突变，可认为有缺陷存在。

通过在模拟工件中设计人工缺陷，探究缺陷的多种检验方法，优选最佳相控阵超声检测方法进行模拟检测，并根据结果验证该检测方法和检测工艺的效果。

### 1.4 直射法

该方法通过专用检测工装对相控阵超声波传播方向加以限制，使中心声束沿螺栓孔薄弱处的切面传播，出现反射波信号时，可认为有缺陷存在，避免出现漏检和误判。

#### 1.4.1 CIVA 软件模拟直射法

将变桨轴承三维模型和工装的三维模型导入 CIVA 软件，采用 5L16-A1 型号探头搭配横波折射角为 55°的楔块对螺栓孔缺陷进行模拟检测，直射法探头扫查位置如图 4 所示，采用 35°~73°扇形扫查。

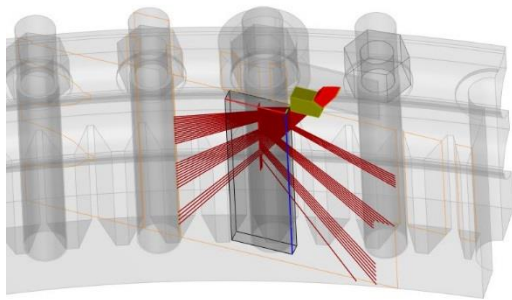


图 4 直射法探头扫查位置

Fig.4 Probe scanning position of the direct beam method

在螺栓孔四周以螺栓孔中心辐射状设置矩形模拟裂纹，位置及尺寸见表 2。直射法探头移动方向如图 5 所示。将工装上的检测辅助面旋转至与螺栓孔薄弱处的切面平行，将探头置于检测辅助面处，并沿检测辅助面前后移动，即可对该检测位置距表面深度范围 8~120 mm 区域实现检测。距表面深度 0~8 mm 区域由于存在螺栓垫片影响，可采用折射角度为 18°的纵波楔块从齿面进行扇形扫描

补充扫查；当检测范围不能覆盖整个齿宽或需检测更大范围，对更远区域可采用 0~18°纵波扇形扫描进行补充扫查<sup>[6]</sup>。

表 2 直射法模拟缺陷分布  
Tab.2 Simulation defect distribution of the direct beam method

缺陷距表面深度/mm	10	30	50	70
长×宽/(mm×mm)	5×2	8×2	10×2	15×2

当进行其他检测位置的相控阵超声扫查时，旋转工装至检测位置的螺栓孔切面处即可。

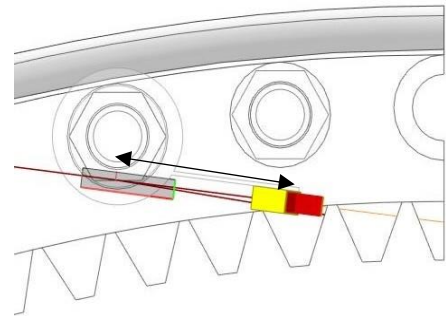


图 5 直射法探头移动方向

Fig.5 Probe moving direction of the direct beam method

#### 1.4.2 直射法模拟结果

直射法的检测结果如图 6 所示。当增益调整了 21 dB 时，最弱的缺陷信号波幅值能达到屏幕的 80%。通过在有限的空间移动探头，可实现对整个深度范围的检测。

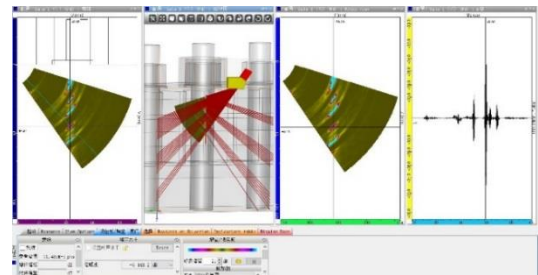


图 6 直射法模拟检测结果

Fig.6 Simulation test results of the direct beam method

### 1.5 扇扫描偏转法

该方法通过采用特制楔块对直探头的扇形扫描进行偏转，使其扇形扫描声束从侧面斜射向螺栓孔。根据扫查图像，移动探头使中部声束直射向螺栓孔内壁，此时两侧声束可扫查到螺栓孔两侧，由于螺栓孔的结构原因，反射波强度将连续变化，当反射波强度突变，可认为突变处有缺陷存在。

#### 1.5.1 CIVA 软件模拟扇扫描偏转法

在 CIVA 软件中导入变桨轴承三维模型，选用

5L16-A1 型号探头进行模拟检测,设置探头为 $-30^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的横波扇形扫查,并将晶片设置偏转 $30^{\circ}$ (由于CIVA软件中不设置楔块时不能设置晶片偏转角度,因此设置了折射角度为 $0^{\circ}$ 的楔块)。在螺栓孔两侧设置2处矩形模拟裂纹,缺陷位置及尺寸见表3,将探头放置于2处缺陷连线的中垂线上进行扇形扫查,移动探头使中部声束直射向螺栓孔壁,此时两侧部分声束将沿螺栓孔壁的切面传播,当其声束射向缺陷位置时,即可发现缺陷,扇扫描偏转法检测探头放置位置如图7所示。此时,在相控阵检测仪器显示屏上,扇扫图像中央将出现螺栓孔壁的反射图像,反射波强度从中央向两侧逐渐降低,而缺陷所在位置反射波强度突然升高,扫查图像如图8所示。

表3 扇扫描偏转法模拟缺陷分布  
Tab.3 Simulation defect distribution of the sector scan deflection method

缺陷距表面深度/mm	30	30
长×宽/(mm×mm)	5×1	8×2

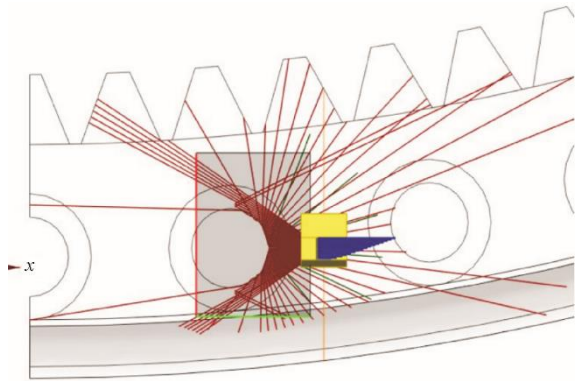


图7 扇扫描偏转法检测探头放置位置  
Fig.7 Probe scanning position of the sector scan deflection method

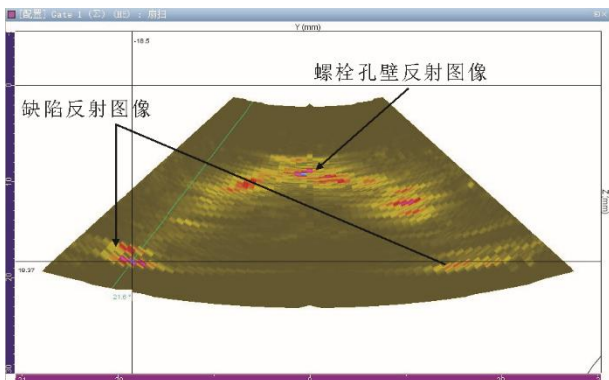


图8 扇扫描偏转法检测的扇形扫查图像  
Fig.8 Sector scan image detected by the sector scan deflection method

### 1.5.2 扇扫描偏转法模拟结果

扇扫描偏转法模拟检测结果如图9所示。扇

扫描偏转法探头移动方向如图10所示。增益调整了9dB时,缺陷的回波可达到满屏的80%。根据上述检测方法,沿图10中的移动方向1移动探头,此时探头沿螺栓孔中心做环状运动,可检测该深度处整周缺陷;在各个位置沿移动方向2移动探头,可对该方向不同深度进行缺陷检测,如果探头移动受限,可选用折射角度更小的楔块,以实现对该检测区域的完全覆盖。

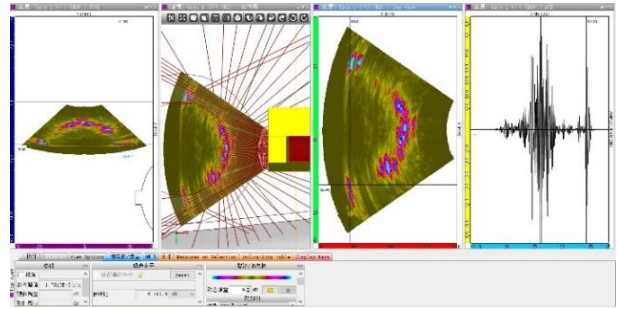


图9 扇扫描偏转法模拟检测结果  
Fig.9 Simulation test results of the sector scan deflection method

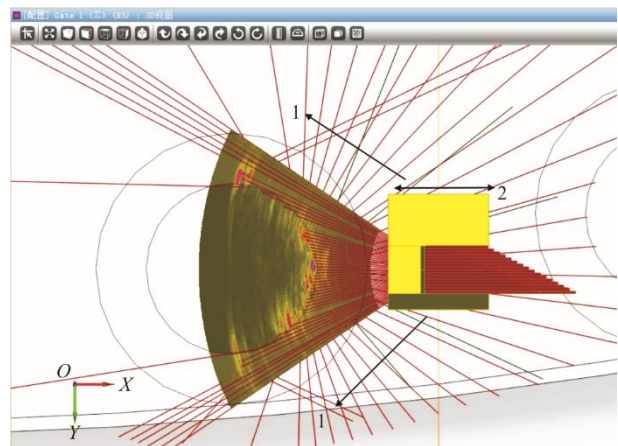


图10 扇扫描偏转法探头移动方向  
Fig.10 Probe moving direction of the sector scan deflection method

## 2 试验研究

在现场取样的变桨轴承上加工矩形槽,尺寸见表4,以不同深度处横孔( $\Phi 2$  mm)的反射波幅制作DAC曲线,对直射法进行验证<sup>[24]</sup>。

表4 人工缺陷分布  
Tab.4 Distribution of artificial defect

缺陷距表面深度/mm	10	30	50	70
长×宽/(mm×mm)	5×1	8×2	10×3	15×4

### 2.1 直射法试验验证

选用5L16-A1型号探头搭配折射角为 $55^{\circ}$ 的横波楔块,结合检测工装对人工缺陷进行检测,直射

法扫查如图 11 所示。采用 35°~70°的扇形扫查，沿检测工装移动探头，可实现对螺栓孔 8~110 mm 深度的缺陷检测，扫查图像如图 12 所示。对缺陷位置和缺陷尺寸进行统计，对比表 4 数据发现，相控阵超声检测的位置偏差和尺寸偏差均在 4% 以内，即均在可接受范围内，详细结果见表 5。



图 11 直射法扫查

Fig.11 Scanning using the direct beam method

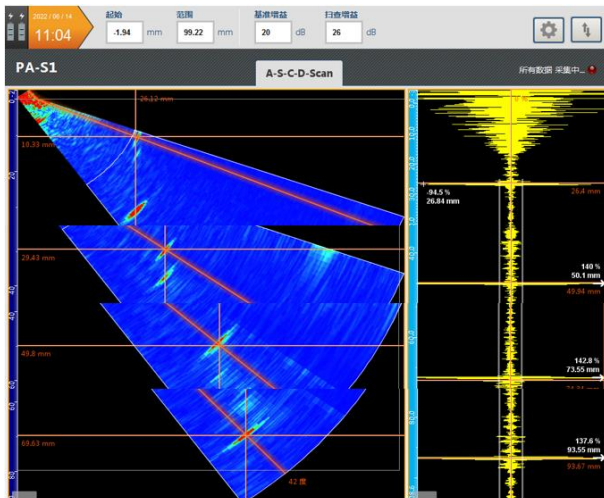


图 12 直射法扫查图像

Fig.12 Scan image of the direct beam method

表 5 直射法检测结果

Tab.5 Test results by the direct beam method

位置/mm	10.33	29.43	49.80	69.63
尺寸/mm	5.13	7.74	10.21	15.46
位置偏差/%	3.3	1.9	0.4	0.5
尺寸偏差/%	2.60	0.75	2.10	3.10

### 2.2 扇扫描偏转法试验探究

在现有的相控阵仪器内置算法中，线阵相控阵探头仅能实现扫查面内的偏转，面阵相控阵探头能

实现扫查面的旋转，但不能实现偏转，故扇扫描偏转法目前尚不能通过试验进行验证，需等待后续算法开发后再进行验证。

## 3 结 论

结合变桨轴承的结构特征，提出了直射法和扇扫描偏转法 2 种检测方法，并采用 CIVA 软件进行了模拟验证，得出如下结论。

- 1) 直射法借助检测工装实现中心声束沿螺栓孔薄弱处处切面传播，可避免现有检测方法中的漏检现象。
- 2) 扇扫描偏转法采用楔块对扇形扫描进行偏转，可根据不同位置反射波强度判断是否存在缺陷。
- 3) 采用直射法对变桨轴承试块进行相控阵超声检测，检测结果与缺陷特征的对比结果表明，位置误差和尺寸误差均在 4% 以内，即该方法可以应用于变桨轴承螺栓孔缺陷的检测，并可为风机其他螺栓孔的检测提供参考。

### [参 考 文 献]

[1] 张武能, 汪毅, 张留斌, 等. 输电铁塔螺栓连接结构健康监测技术进展与展望[J]. 中国电力, 2021, 54(2): 18-26.  
ZHANG Wuneng, WANG Yi, ZHANG Liubin, et al. Development and prospect of structure health monitoring technologies for bolted joints of transmission towers[J]. Electric Power, 2021, 54(2): 18-26.

[2] LIU E X, LIU Y M, CHEN Y L, et al. Measurement method of bolt hole assembly stress based on the combination of ultrasonic longitudinal and transverse waves[J]. Applied Acoustics, 2022, 189: 108603.

[3] 卢维富, 齐东栋, 邓承佯, 等. LY12 螺栓孔裂纹失效分析[J]. 教练机, 2015(4): 32-36.  
LU Weifu, QI Dongdong, DENG Chengyang, et al. Analysis on crack failure of LY12 bolt hole[J]. Trainer, 2015(4): 32-36.

[4] 乔乔, 李晓秀, 周江伟, 等. 螺栓连接预紧力对结构疲劳性能的影响[J]. 失效分析与预防, 2021, 16(3): 166-172.  
QIAO Qiao, LI Xiaoxiu, ZHOU Jiangwei, et al. Influence of pre-tightening force of bolt connection on fatigue life performance of structure[J]. Failure Analysis and Prevention, 2021, 16(3): 166-172.

[5] 焦少阳, 郑越, 路晓晖. 主给水管道横向限制件螺栓断裂研究[J]. 机电产品开发与创新, 2022, 35(1): 143-147.  
JIAO Shaoyang, ZHENG Yue, LU Xiaohui. The fracture research of bolts used in mainwater piping transversal limiters[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2022, 35(1): 143-147.

[6] 赵仑, 蔡晖, 孙璞杰, 等. CIVA 仿真模拟风机变桨轴承的相控阵超声检测[J]. 热力发电, 2022, 51(7): 30-35.  
ZHAO Lun, CAI Hui, SUN Pujie, et al. Phased array ultrasonic detection of cracks in wind turbines pitch

- bearings by CIVA simulation[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(7): 30-35.
- [7] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[R/OL]. (2021-03-13)[2022-06-02]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm)  
Xinhua News Agency. The Outline of 14th Five-Year Plan (2021-2025) for National Economic and Social Development and the Long-Range Objectives Through the Year 2035 of P.R.China[R/OL]. (2021-03-13) [2022-06-02]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm)
- [8] GWEC. Global Wind Report 2021[M]. 2022
- [9] 汪超, 沈黎明, 战茜. 基于 ANSYS 的变桨轴承受力分析[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(2): 32-33.  
WANG Chao, SHEN Liming, ZHAN Qian. Stress analysis of pitch bearing based on finite element method[J]. Metrology & Measurement Technique, 2018, 45(2): 32-33.
- [10] GUI J X, WANG G B, ZHOU Z. Load analysis of pitch bearing considering non-quenching zone[J]. Vibroengineering Procedia, 2019, 25(10): 7-12.
- [11] 陶钢正, 王建国, 王延峰. 某型风电机组变桨轴断裂失效分析[J]. 热加工工艺, 2015, 44(8): 240-242.  
TAO Gangzheng, WANG Jianguo, WANG Yanfeng. Fracture failure analysis on pitch bearing of wind turbine[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(8): 240-242.
- [12] 张涛, 陈浩, 田峰, 等. 大规模 1.5 MW 风力发电机变桨轴承开裂行为分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6344-6351.  
ZHANG Tao, CHEN Hao, TIAN Feng, et al. Analysis on large scale cracking damage for pitch bearings of 1.5 MW wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6344-6351.
- [13] 张新国, 姚兵印, 卢正欣. 1.5 MW 风力发电机组变桨轴承开裂失效分析[J]. 金属加工(热加工), 2019(10): 56-61.  
ZHANG Xinguo, YAO Bingyin, LU Zhengxin. Failure analysis on cracking of the pitch bearing of 1.5 MW wind turbine[J]. Metal Working, 2019(10): 56-61.
- [14] 周正强. 风力发电机组变桨轴承断裂失效分析[J]. 装备制造技术, 2019(8): 99-103.  
ZHOU Zhengqiang. Fracture failure analysis on pitch bearing of wind turbine[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019(8): 99-103.
- [15] 付洋洋, 王荣. 风力发电机组用变桨轴承外圈断裂的原因[J]. 机械工程材料, 2019, 43(4):83-86.  
FU Yangyang, WANG Rong. Reasons for fracture of pitch bearing outer ring in wind turbine generator[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(4): 83-86.
- [16] 李婷, 付德义, 薛扬. 基于 AE 与 STFT 的变桨轴承裂纹诊断研究[J]. 振动·测试与诊断, 2021, 41(2): 299-303.  
LI Ting, FU Deyi, XUE Yang. Research on crack diagnosis of pitch bearing based on AE and STFT[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(2): 299-303.
- [17] 蔡晖, 王鹏, 秦承鹏, 等. 发电厂与电网超声检测技术[M]. 中国电力出版社, 2019: 384-385.  
CAI Hui, WANG Peng, QIN Chengpeng, et al. Ultrasonic testing technology for power plants and power grids[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2019: 384-385.
- [18] 王鹏, 王志强, 蔡晖, 等. 基于全聚焦相控阵超声的叶根槽裂纹检测[J]. 振动·测试与诊断, 2020, 40(6): 1172-1177.  
WANG Peng, WANG Zhiqiang, CAI Hui, et al. Research on crack detection of root groove based on total focusing phased array ultrasonic[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(6): 1172-1177.
- [19] 朱学耕, 董世运, 徐滨士. 基于相控阵超声检测方法的齿轮品质控制研究[J]. 铸造技术, 2016, 37(6): 1301-1304.  
ZHU Xuegeng, DONG Shiyun, XU Binshi. Research on gear quality control by phased array ultrasonic method[J]. Foundry Technology, 2016, 37(6): 1301-1304.
- [20] WANG C, ZHANG W W, WANG H R. Experimental study on crack detection at bolt hole edge in rail joint using the third harmonic[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1676: 012177.
- [21] 杜清良, 周宇, 徐宁, 等. CIVA 仿真在核电厂汽轮机相控阵超声检测中的应用[J]. 工程与试验, 2020, 60(1): 10-11.  
DU Qingliang, ZHOU Yu, XU Ning, et al. Application of CIVA simulation in phased array ultrasonic testing of nuclear power plant turbine [J]. Engineering & Testing, 2020, 60(1): 10-11.
- [22] 韩传高, 王飞, 赵阳, 等. P91 钢管道受限空间焊缝相控阵超声检测[J]. 热力发电, 2021, 50(9): 167-172.  
HAN Chuangao, WANG Fei, ZHAO Yang, et al. Phasedarray ultrasonic testing of P91 pipe weld in confined space[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(9): 167-172.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 滚动轴承 风力发电机组偏航、变桨轴承: GB/T 29717—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013: 10.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Rolling bearings: wind power generators yaw and pitch bearing: GB/T 29717—2013[S]. Beijing: China Standards Press, 2013: 10.
- [24] 国家能源局. 承压设备无损检测 第 15 部分: 相控阵超声检测: NB/T 47013.15—2021[S]. 北京: 北京科学技术出版社, 2021: 45-46.  
National Energy Administration. Nondestructive testing of pressure equipment: part 15: phased-array ultrasonic testing: NB/T 47013.15—2021[S]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 2021: 45-46.

(责任编辑 李园)