

DOI: 10.19666/j.rlfed.202312146

在役风力发电机组变桨轴承高黏润滑油脂附着状态下阵列涡流检测

张福祥¹, 侯召堂¹, 孟永乐¹, 殷尊¹, 吕一楠¹, 孙璞杰¹, 张国辉²,
虞学鹏², 杨立平³, 刘涛³, 常毅君⁴, 蒋金忠⁴

(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蒙东分公司, 内蒙古 通辽 028000;

3.华能酒泉风电有限责任公司, 甘肃 酒泉 736100;

4.华能(浙江)能源开发有限公司玉环分公司, 浙江 台州 317604)

[摘要] 为实现在役风力发电机组变桨轴承高黏润滑油脂附着状态下轮齿齿面的高效精准检测, 采用仿形阵列涡流技术, 研究不同线圈排布方式和提离距离对轴承轮齿齿面缺陷检测结果的影响。结果表明: Z 字型和复合型线圈排布方式的边缘效应范围不同, 复合型仿形探头较 Z 字型明显缩短; 通过检测 10.00 mm×0.50 mm×1.00 mm (槽长×槽宽×槽深) 人工槽缺陷, 得出内、外齿型轴承的提离距离极限分别为 1.04 mm 和 1.43 mm; 对在役风机轴承在表面有高黏润滑油脂条件下进行了试验验证, 检测缺陷尺寸与位置结果准确, 误差小于 5%。该研究成果可为变桨轴承轮齿齿面在役状态下的监督检测提供技术支撑及新思路。

[关键词] 在役风机; 变桨轴承; 高黏润滑油; 涡流检测

[引用本文格式] 张福祥, 侯召堂, 孟永乐, 等. 在役风力发电机组变桨轴承高黏润滑油脂附着状态下阵列涡流检测[J]. 热力发电, 2024, 53(5): 141-148. ZHANG Fuxiang, HOU Zhaotang, MENG Yongle, et al. Array eddy current testing of pitch bearings for in-service wind turbines with high viscosity lubricating grease adhesion[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(5): 141-148.

Array eddy current testing of pitch bearings for in-service wind turbines with high viscosity lubricating grease adhesion

ZHANG Fuxiang¹, HOU Zhaotang¹, MENG Yongle¹, YIN Zun¹, LYU Yinan¹, SUN Pujie¹, ZHANG Guohui²,
YU Xuepeng², YANG Liping³, LIU Tao³, CHANG Yijun⁴, JIANG Jinzhong⁴

(1.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2.Huaneng New Energy Co., Ltd., Mengdong Branch, Tongliao 028000, China; 3.Huaneng Jiuquan Wind Power Co., Ltd., Jiuquan 736100, China;

4.Huaneng (Zhejiang) Energy Development Co., Ltd., Yuhuan Branch, Taizhou 317604, China)

Abstract: In order to realize efficient and accurate detection of the pitch bearing tooth surface of wind turbines in service under the adhesion of high viscosity lubricating grease, profiling array eddy current technology is used to study the effects of different coil arrangement methods and lifting distances on the detection results of bearing tooth surface defects. It can be concluded that, the edge effect range of Z-shaped and composite coil layout is different, and the composite profiling probe is significantly shorter than the Z-shaped probe. By detecting the artificial groove defects of 10.00 mm×0.50 mm×1.00 mm (slot length × slot width × slot depth), it indicates that the lifting distance limits for inner and outer toothed bearings are 1.04 mm and 1.43 mm, respectively. Experimental verification is conducted on the in-service fan bearings under the condition of high viscosity lubricating grease on the surface, and the results of defect size and position detection are accurate, with an error of less

修回日期: 2023-12-23

基金项目: 西安热工研究院有限公司科技项目 (TN-22-TYK12); 中国华能集团有限公司企业标准 (TX-22-HNQBZ03-01)

Supported by: Science and Technology Project of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. (TN-22-TYK12); Enterprise Standard of China Huaneng Group Co., Ltd. (TX-22-HNQBZ03-01)

第一作者简介: 张福祥 (1990), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电站金属材料失效分析及检测评估, zhangfuxiang@tpri.com.cn.

通信作者简介: 侯召堂 (1980), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电站金属材料无损检测, houzhaotang@tpri.com.cn.

than 5%. This provides technical support and new ideas for supervision and inspection of the pitch bearing gear tooth surface in service.

Key words: in-service wind turbines; pitch bearing; high viscosity lubricating oil; eddy current testing

在“双碳”目标指引下，风力发电逐渐从补充能源向主流能源转变，成为全球实现碳中和目标的主力军，同时，也是我国参与国际竞争的战略性高端绿色装备制造产业之一^[1-3]。风力发电机组主要由叶片、变桨系统、传动系统、偏航系统、塔架、塔筒等组成^[4]。风力发电机组的使用寿命最短为 20 年，而风力发电机组绝大部分部件均距地面数十米甚至上百米，服役期间，若因各种原因导致这些部件更换或下架，则会大大增加风机的运维成本。变桨轴承是在役风力发电机变桨系统组的重要核心构件，其质量可靠性直接决定风力发电机组的安全运行^[5-7]。同时，由于其尺寸大、刚性差、工作受载复杂等特点，风机正常运行及启停阶段均会受到复杂的交变载荷，应力集中部位易出现裂纹，对其工作寿命提出了严峻的考验^[8]。

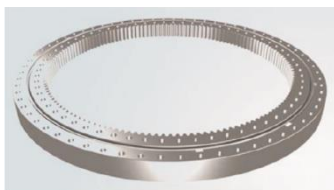
风机轴承轮齿在制造过程中多采用磁粉检测缺陷，但是轴承组装完成后，因结构限制，且轴承轮齿表面缺陷有高黏润滑油脂附着，导致磁粉检测难以实施^[9-12]。目前，主要通过风场巡检人员外观目视手段检查在役风机轴承齿面裂纹情况，高度依赖现场巡检人员素养与经验，导致检测精度差、效率低。为此，亟需开发一种高效、精准检测在役风机轴承轮齿齿面缺陷的方法。

涡流检测是建立在电磁感应原理基础之上的一种无损检测方法，由于轴承轮齿为导电材料，涡流检测适用于表面和近表面裂纹检测，并且对涡流检测探头进行仿轮齿形状设计，大大提高了轮齿裂纹的检测率^[13-15]。本文采用涡流检测技术在役风机变桨轴承轮齿表面缺陷进行检测。

1 变桨轴承与阵列涡流检测技术

1.1 变桨轴承

变桨轴承主要组成部件为套圈、滚珠、保持架等^[16]。变桨轴承按照动力传递方式分为外齿式和内齿式，典型宏观形貌如图 1 所示。



a) 内齿式



b) 外齿式

图 1 2 种典型结构的变桨轴承宏观形貌
Fig.1 Macro morphology of the pitch bearings with two typical structures

1.2 阵列涡流检测技术

阵列涡流检测 (eddy current arrays, ECA) 技术是近些年出现的一项新型涡流检测技术，它是通过涡流线圈结构的特殊设计，并借助涡流仪强大的分析、计算及处理功能，实现对材料和零件快速、有效地检测^[17]。

2 仿形阵列涡流检测变桨轴承轮齿齿面缺陷

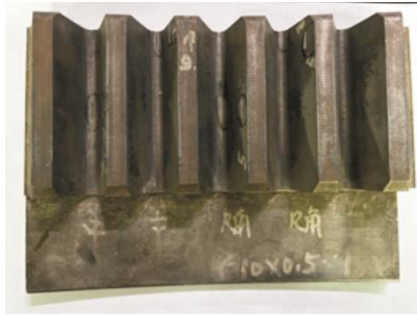
轴承轮齿处缺陷主要起源于轮齿齿面，即缺陷为表面缺陷^[18-20]，且在役条件下，轮齿齿面可成为检测面。为此，针对表面缺陷，通过对比常用的无损检测方法特点，选择阵列涡流检测方法可有效解决常规表面无损检测方法 (磁粉检测和渗透检测) 无法对高黏润滑油脂附着状态下轴承轮齿面进行检测的问题，且检测效率高。轮齿被检测面范围大，为了高效检出轴承轮齿齿面缺陷，使用八通道仿形阵列涡流探头对缺陷进行检测，仿形指阵列涡流探头外壳体与轴承轮齿尺寸、形状相适应。

2.1 人工缺陷的设计

内齿型和外齿型变桨轴承实物形貌如图 2 所示。轴承轮齿齿面裂纹方向通常平行或垂直于轴承轴向，综合目前 ETC 涡流仪的检测灵敏度和危害变桨轴承运行安全因素，在轮齿齿面设计人工缺陷，缺陷尺寸为 $10.0 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ (槽长×槽宽×槽深)，人工缺陷位置示意如图 3 所示。

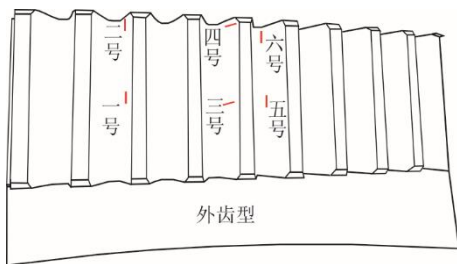


a) 外齿型

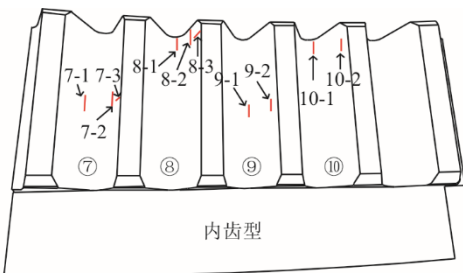


b) 内齿型

图 2 内、外齿型变桨轴承轮齿形貌
Fig.2 Tooth morphology of the inner and outer toothed pitch bearings



a) 外齿型



b) 内齿型

图 3 人工缺陷位置分布示意
Fig.3 Schematic diagram of distribution of the artificial defects locations

2.2 线圈排布方式对检测结果的影响

针对轮齿齿型特征，设计仿形探头壳体，探头壳体内存有检测线圈。

通过建立单通道探头检测平板试块缺陷的有限元模型，对线圈的直径、高度、匝数和激励频率进行优化。在此基础上，得出检测轮齿试块的有限元模型仿真结果，验证多通道探头检测变桨轴承轮齿齿面的检测效果。

仿真计算时，空气主要由探头间隙空气、探头脱离空气、近场空气及远场空气组成，用来模拟磁场衰减和解决磁场截断效应问题，从而保证仿真的准确性。采用线圈平行于缺陷方向扫查的检测方式，三维实体模型如图 4 所示。

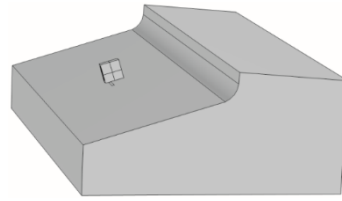


图 4 仿真三维实体模型
Fig.4 The simulated three-dimensional solid model

1) 激励频率优化

激励频率以 10 kHz 为间隔在 60~140 kHz 间依次变化，记录每个频率点的感应电动势信号幅值，幅值特性曲线如图 5 所示。由图 5 可知：激励频率小于 100 kHz 时，电压幅值随着激励频率增加而增加；激励频率大于 100 kHz 时，激励频率增加，电压幅值减小；当激励频率为 100 kHz 时，电压幅值最大。

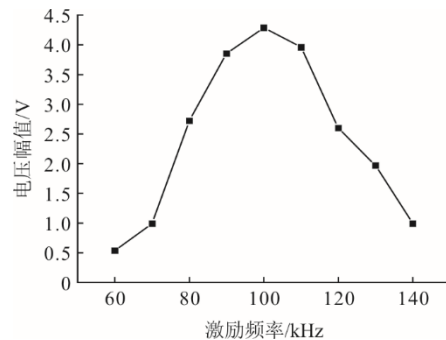


图 5 不同激励频率涡流幅值特性曲线
Fig.5 The eddy current amplitude curve at different excitation frequencies

2) 线圈线径优化

将激励线圈线径分别设置为 0.035、0.050、0.065、0.080、0.095、0.110 mm，研究线圈线径对磁场的影响，结果如图 6 所示。由图 6 可见，线圈线径大小对感应电动势影响明显，电压幅值随线圈线径增加而减小。

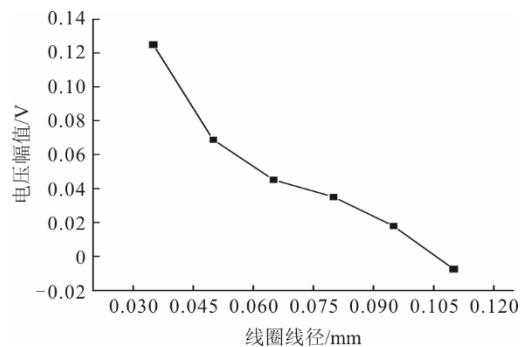


图 6 线圈不同线径涡流幅值特性曲线
Fig.6 The eddy current amplitude curve for coils with different wire diameters

3) 线圈匝数优化

激励线圈匝数从 40 匝变化到 240 匝, 观察线圈匝数变化对磁场的影响, 结果如图 7 所示。由图 7 可见, 随着线圈匝数提高, 电压幅值逐渐升高, 最后匝数增长至 160 匝左右, 幅值变化量达到最大并趋于平稳。

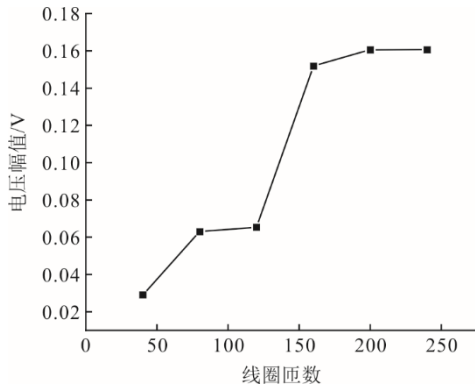


图 7 线圈不同匝数涡流幅值特性曲线

Fig.7 The eddy current amplitude curve for coils with different turns

4) 激励线圈高度优化

激励线圈高度直接影响磁场的大小和检测深度。将激励线圈高度分别设置为 2、3、4、5、6 mm, 激励线圈高度对检测信号感应电动势的影响如图 8 所示。

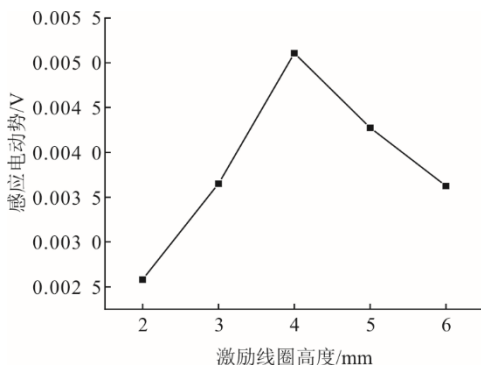


图 8 线圈不同高度涡流幅值特性曲线

Fig.8 The eddy current amplitude curve at different heights of the coil

综上所述, ECA 的激励频率为 100 kHz, 激励线圈高度 4 mm, 匝数为 160 匝时检测效果较好。

在线圈排布上, 为适应狭小检测空间条件下检测, 分别设计 Z 字型和一字型。Z 字型为线圈与线圈间呈 Z 字型交叉错位排布, 一字型为线圈与线圈间呈一字型排布。为有效提高一字型线圈排布方式对轮齿齿底工作面的检测效果, 将探头前端实物线圈设计为 Z 字型, 即设计为一字与 Z 字型线圈排布

方式的复合型排布方式。Z 字型与复合型探头壳体如图 9 所示。

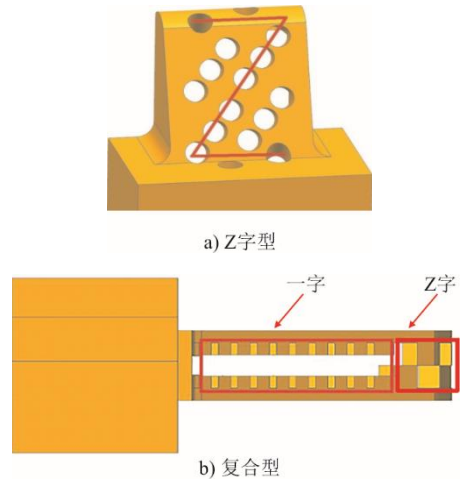
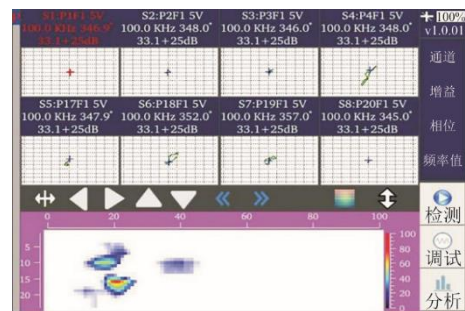


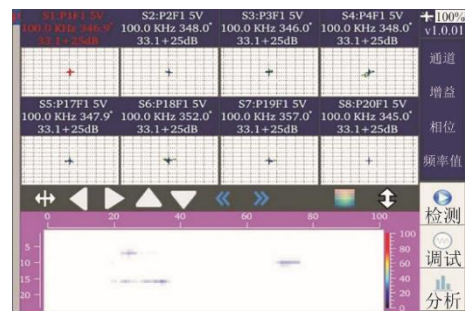
图 9 Z 字型和复合型线圈排布示意

Fig.9 Schematic diagram of Z-shaped and composite coil layout

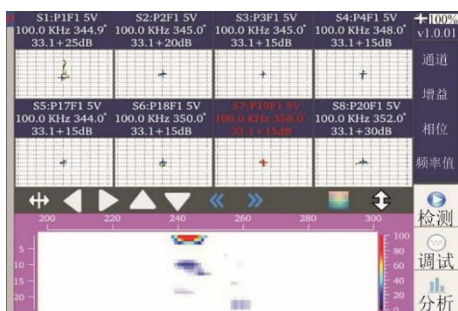
以外齿型轴承为例, 采用 Z 字型、复合型线圈排布方式的涡流探头对 2 号、4 号、6 号试块人工槽缺陷进行检测, 检测结果如图 10 和图 11 所示。结果包括 8 个通道, 分别检测轮齿齿面不同位置的阻抗信号和依据阻抗信号强度呈现的缺陷成像结果。缺陷信号定义为阻抗图信号纵向大于等于 1 格 (缺陷信号大于等于 1 格时, 缺陷信号的信噪比达到 3:1, 信噪比良好)。缺陷阻抗信号呈竖直相位, 或者与竖直方向呈一定角度的信号, 与纵向夹角一般小于 45°。



a) 2号缺陷信号

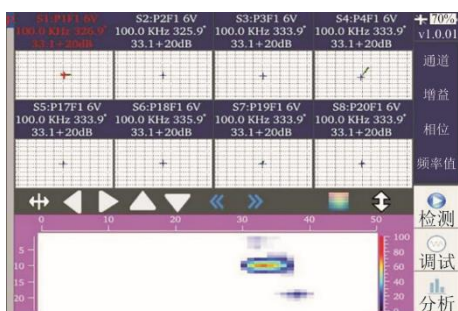


b) 4号缺陷信号

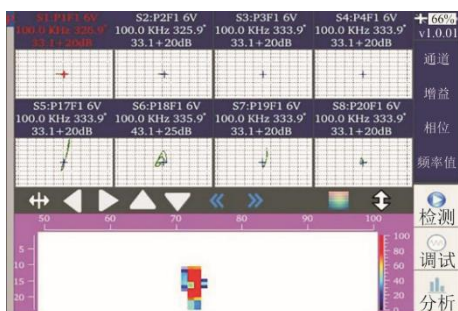


c) 6号缺陷信号

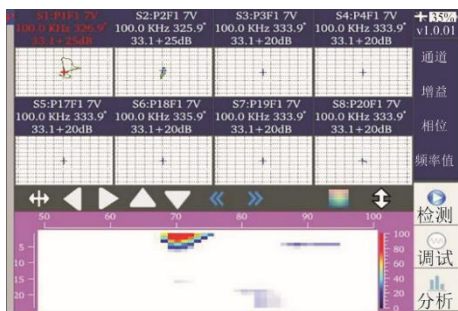
图 10 Z 字型线圈检测结果
Fig.10 The detection results of Z-shaped coil



a) 2号缺陷信号



b) 4号缺陷信号



c) 6号缺陷信号

图 11 复合型线圈检测结果

Fig.11 The detection results of composite-shape coil

由图 10a)可知, 2 号缺陷平行于齿根且位于齿边缘处, 第 4 通道出现缺陷信号, 由于第 5—第 7 通道临近边缘, 发生边缘效应。缺陷信号与滑移信号同时出现, 且缺陷信号幅值不高, 其原因是 Z 字型线圈排布方式存在较大检测边缘距离所致, C 扫描图在第 5—第 7 通道范围内呈现的图像为边缘效

应产生, 而非缺陷产生。由图 10b)可知, 4 号缺陷(垂直于变桨轴承轴向)处于轮齿边缘, 未能有效检测出。由图 10c)可知, 在第 1 通道出现的阻抗信号为 6 号缺陷(平行于变桨轴承轴向)检测信号, C 扫描图中在第 1 通道范围内呈现水平缺陷信号。

由图 11a)可知, 在第 4 通道出现缺陷阻抗信号为 2 号缺陷(平行于变桨轴承轴向, 且位于齿边缘处)检测信号, C 扫描图在第 4 通道范围内呈现水平缺陷信号。由图 11b)可知, 在第 5—第 8 通道存在阻抗信号, 第 5—第 7 通道阻抗信号为 4 号缺陷(垂直于变桨轴承轴向, 处于轮齿边缘)检测信号, 第 8 通道阻抗信号为边缘效应所致, C 扫描图在第 5—第 7 通道范围内呈现垂直缺陷信号。由图 11c)可知, 在第 1 通道存在缺陷阻抗信号, 为 6 号缺陷平行于变桨轴承轴向)检测信号, C 扫描图中在第 1 通道范围内呈现水平缺陷信号。

根据图 10 和图 11 的涡流检测结果可知, Z 字型线圈排布方式检测外齿型轴承轮齿齿面尺寸为 10.00 mm×0.50 mm×1.00 mm (槽长×槽宽×槽深)的不同人工槽缺陷时, 缺陷信号成像断续, 呈现缺陷形貌特征效果较差。且对轴承轮齿边缘的 2 号、4 号和 6 号缺陷的检测效果差。复合型线圈排布方式检测外齿型轴承轮齿齿面尺寸为 10.0 mm×0.5 mm×1.0 mm (槽长×槽宽×槽深)的不同人工槽缺陷时, 1—6 号缺陷信噪比均大于 3:1, 检测边缘距离显著缩小, 扩大了检测范围。

2.3 提高距离对检测结果的影响

特氟龙胶带可以防止仿形涡流探头的磨损, 一层特氟龙胶带厚度约为 0.13 mm, 为模拟高黏润滑油脂附着状态下的检测, 须研究提高距离对检测信号的影响, 为此, 采用粘贴不同层数特氟龙胶带, 对内、外齿型变桨轴承轮齿齿面人工缺陷进行检测。

随着特氟龙胶带层数的增加, 缺陷信噪比不断降低。当增加特氟龙胶带的层数, 直至缺陷检测信噪比小于 3:1 为止, 获得内、外齿型轴承检测允许提高距离极限。针对外齿型轴承, 对试块中 1 号缺陷进行检测, 当特氟龙胶带层数粘贴至 12 层时, 缺陷信噪比小于 3:1, 检测结果如图 12 所示。针对内齿型轴承, 对试块中 9-1 和 9-2 缺陷进行检测, 当特氟龙胶带层数粘贴至 9 层时, 缺陷信噪比小于 3:1, 检测结果如图 13 所示。由图 12、图 13 可以得出, 内、外齿型轴承的提高距离极限分别为 1.04 mm 和 1.43 mm, 均大于润滑油脂层的厚度(约 0.50 mm)。

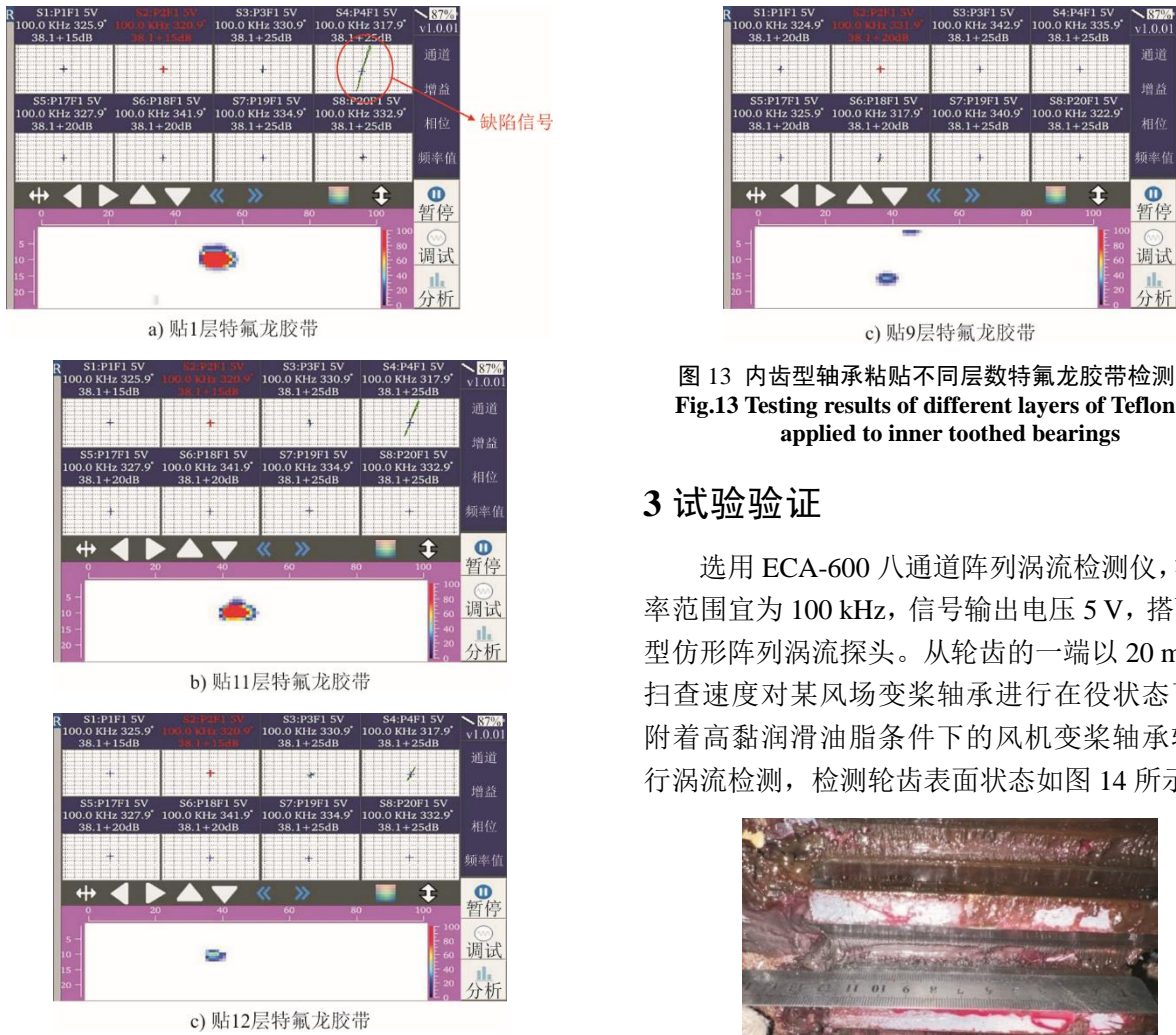


图 12 外齿型轴承粘贴不同层数特氟龙胶带检测结果
Fig.12 Testing results of different layers of Teflon tape applied to external toothed bearings

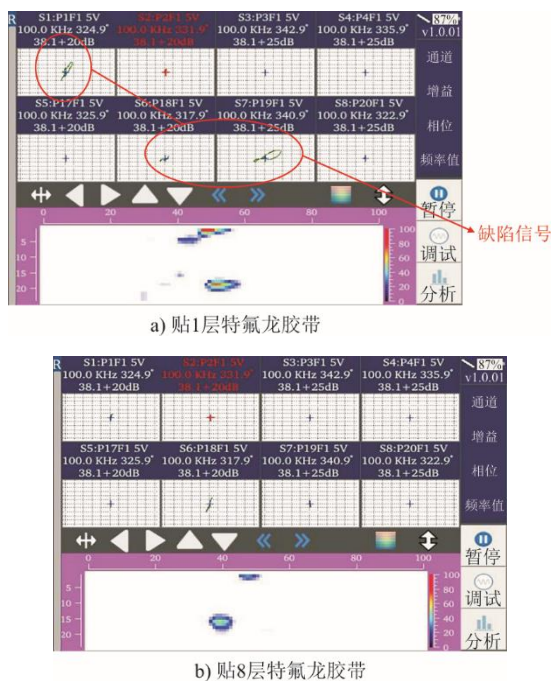


图 13 内齿型轴承粘贴不同层数特氟龙胶带检测结果
Fig.13 Testing results of different layers of Teflon tape applied to inner toothed bearings

3 试验验证

选用 ECA-600 八通道阵列涡流检测仪，激励频率范围宜为 100 kHz，信号输出电压 5 V，搭配复合型仿形阵列涡流探头。从轮齿的一端以 20 mm/s 的扫查速度对某风场变桨轴承进行在役状态下表面附着高黏润滑油脂条件下的风机变桨轴承轮齿进行涡流检测，检测轮齿表面状态如图 14 所示。



图 14 高黏润滑油脂附着状态下变桨轴承轮齿齿面
Fig.14 Pitch bearing gear tooth surface under high viscosity lubricating grease adhesion state

高黏润滑油脂附着条件下，轮齿表面缺陷目视难以发现。经现场清理油脂后，磁粉检测证实齿根处存在一条长度 34.5 mm 的裂纹，裂纹起始于距离轴承端面 11.5 mm 处，磁粉检测结果如图 15 所示。



图 15 清理油脂后磁粉检测结果
Fig.15 Testing results of magnetic particle after cleaning oil

采用内齿型分离式复合型涡流仿形探头对在役风机高黏润滑油脂附着状态下变桨轴承轮齿齿面进行检测,检测结果如图16所示。

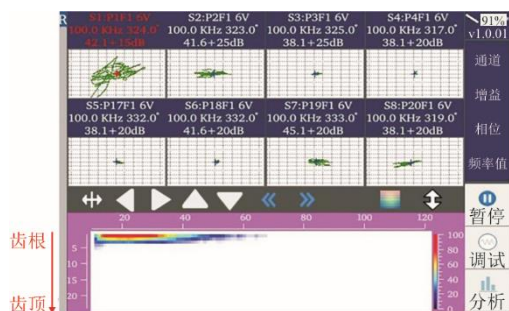


图16 仿形阵列涡流检测结果

Fig.16 Results of profiling eddy current array testing

由图16可知,在第1通道存在典型缺陷阻抗信号,且C扫描图中第1通道范围内呈现水平缺陷信号,表明缺陷位置为齿根处,检测缺陷起始于轴承端面距离为12 mm处,检测缺陷长度约为36 mm,与磁粉检测结果相比误差小于5%。

综上所述,研发的涡流检测方法对在役风机变桨轴承齿面存在高黏润滑油脂附着状态下进行检测,缺陷信号信噪比均大于3:1,无缺处噪声信号的纵轴幅值保持在1格内,C扫描的缺陷成像清晰,检测缺陷位置与尺寸准确。

4 结 语

针对轴承轮齿齿面缺陷的特征,研究了仿形阵列涡流检测技术。设计和制作了一体式Z字型和分离式复合型仿形探头,得出了Z字型和复合型线圈排布方式的边缘效应范围不同,复合型仿形探头较Z字型明显缩短。研究了提高距离与缺陷检测的响应关系,通过检测10.0 mm×0.5 mm×1.0 mm(槽长×槽宽×槽深)人工槽缺陷,得出内、外齿型轴承的提高距离极限分别为1.04 mm和1.43 mm;对在役风机轴承在表面有高黏润滑油脂条件下进行了试验验证,检测缺陷尺寸与位置结果准确,误差小于5%。

【参 考 文 献】

[1] 李忠财,杨义根,陈晨,等.基于“双碳”目标下我国电力行业低碳建设管理的探讨[J].现代工业经济和信息化,2023,13(7):160-162.
LI Zhongcai, YANG Yigen, CHEN Chen, et al. Exploration of low carbon construction management in China's electric power industry based on the "Double Carbon" goal[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2023, 13(7): 160-162.
[2] 刘万平,果岩.双碳目标下风电设备及技术发展趋

势[J]. 电器工业,2023(6):1-7.

LIU Wanping, GUO Yan. Development trends of wind power equipment and technology under the dual carbon target[J]. China Electrical Equipment Industry, 2023(6): 1-7.

- [3] 沈澜,陈连杰.中国实现碳达峰、碳中和目标存在的挑战和实施路径分析[J].产业创新研究,2022(19):1-6.
SHEN Lan, CHEN Lianjie. Analysis of the challenges and implementation paths for China to achieve carbon peak and carbon neutrality goals[J]. Industrial Innovation, 2022(19): 1-6.
[4] 马建华,韩献科,钱康,等.风力发电机组电站系统仿真软件开发与应用[J].上海电力大学学报,2022,38(3):287-293.
MA Jianhua, HAN Xianke, QIAN Kang, et al. Development and application of wind turbine power station system simulation software[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2022, 38(3): 287-293.
[5] 陈晨,刘勇,李亚,等.风力发电机变桨轴承强度分析及影响因素[J].轴承,2023(6):59-63.
CHEN Chen, LIU Yong, LI Ya, et al. Strength analysis and influencing factors of wind turbine pitch bearings[J]. Bearing, 2023(6): 59-63.
[6] 薛永盛,刘鹏鹏,杨晓荣.风力发电站变桨轴承断裂分析[J].金属功能材料,2022,29(5):77-81.
XUE Yongsheng, LIU Pengpeng, YANG Xiaorong. Fracture analysis of pitch bearing in wind power station[J]. Metallic Functional Materials, 2022, 29(5): 77-81.
[7] CHEN Y M, JIN X, YUE Y, et al. Investigation on 3D fatigue crack propagation in pitch bearing raceway of offshore wind turbines[J]. Ocean Engineering, 2023, 269: 113524.
[8] 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.
[9] 付双军,钟本旺,田丰,等.自动润滑系统在风机变桨轴承上的应用现状及问题解决方法[J].内燃机与配件,2019(18):247-249.
FU Shuangjun, ZHONG Benwang, TIAN Feng, et al. The application status and problem solving methods of automatic lubrication system on fan pitch bearing[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019(18): 247-249.
[10] 胡雪松.风力发电机变桨轴承润滑解决方案[J].价值工程,2011,30(13):35-36.
HU Xuesong. Lubrication solutions of pitch bearing about wind turbine[J]. Value Engineering, 2011, 30(13): 35-36.
[11] SCHWACK F, BADER N, LECKNER J, et al. A study of grease lubricants under wind turbine pitch bearing conditions[J]. Wear, 2020, 4541455: 203335.
[12] 赵雁,崔旋,戴天任,等.风电偏航和变桨轴承的安装与维护[J].轴承,2012(7):54-57.
ZHAO Yan, CUI Xuan, DAI Tianren, et al. Installation and maintenance of wind power yaw and pitch bearings[J]. Bearing, 2012(7): 54-57.
[13] 王慧.无损检测技术的常见类型以及在焊接检测中的应用[J].造纸装备及材料,2023,52(5):119-121.
WANG Hui. Common types of non-destructive testing techniques and their applications in welding

- inspection[J]. Papermaking Equipment & Materials, 2023, 52(5): 119-121.
- [14] 李禹东. 涡流无损探伤检测技术的应用研究[J]. 仪器仪表用户, 2022, 29(7): 1-4.
LI Yudong. Application of eddy current nondestructive detection[J]. Instrumentation Customer, 2022, 29(7): 1-4.
- [15] 尹利, 尤永洪, 路凤玲, 等. 阵列涡流检测性能验证技术研究[J]. 金属加工(热加工), 2022(6): 114-116.
YIN Li, YOU Yonghong, LU Fengling, et al. Research on performance verification technology of array eddy current testing[J]. Metal Working, 2022(6): 114-116.
- [16] 宋云博, 孟春玲, 王瑞杰, 等. 风力发电机组变桨轴承建模方法的研究[J]. 机械研究与应用, 2022, 35(5): 13-19.
SONG Yunbo, MENG Chunling, WANG Ruijie, et al. Comparative study on modeling method of wind turbine pitch bearing[J]. Mechanical Research & Application, 2022, 35(5): 13-19.
- [17] 邵雨果. 基于阵列电涡流技术的飞机蒙皮无损检测研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2010: 1.
SHAO Yuguo. Research of nondestructive testing for aircraft skin based on array eddy current[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2010: 1.
- [18] 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.
- [19] 张立柱, 赵登利. 风机变桨轴承齿面磨损与齿轮可靠度分析[J]. 轴承, 2019(1): 32-35.
ZHANG Lizhu, ZHAO Dengli. Analysis on wear of tooth surfaces and reliability of gears for pitch bearings in wind turbines[J]. Bearing, 2019(1): 32-35.
- [20] 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 of pitch bearing cracking in 1.5 MW wind turbine generator set[J]. Metal Working, 2019(10): 56-61.

(责任编辑 邓玲惠)

广告目次

《热力发电》青年编委招募.....	封三
浙江顺豪新材料有限公司.....	后彩插 1
国核自仪系统工程有限公司.....	后彩插 2
南京常荣声学股份有限公司.....	后彩插 3
美尔森碳制品(上海)有限公司.....	后彩插 4
西安热工研究院有限公司.....	后彩插 5—26
《热力发电》.....	后彩插 27
西安热工研究院有限公司.....	后彩插 28—31
上海冠龙阀门节能设备股份有限公司.....	后彩插 32