

DB32

江 苏 省 地 方 标 准

DB32/T 5134—2025

风电机组螺栓相控阵超声导波成像
检测技术导则

Technical guideline for phased array ultrasonic guided wave
imaging inspection of wind turbine bolts

2025-05-21 发布

2025-06-21 实施

江苏省市场监督管理局 发 布
中 国 标 准 出 版 社 出 版

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 检测原理	2
5 人员要求	3
6 安全要求	3
7 检测工艺规程	3
8 检测设备和器材	4
9 检测准备	5
10 检测设置	6
11 检测实施	7
12 缺陷评定	7
13 检测记录及报告	7
参考文献	9

前　　言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分:标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由江苏省特种设备安全检验与节能标准化技术委员会提出并归口。

本文件起草单位:江苏方天电力技术有限公司、江苏省特种设备安全监督检验研究院、南京华中检测有限公司、武汉中科创新技术股份有限公司、南京市锅炉压力容器检验研究院、国家电投集团江苏新能源有限公司、江苏联能电力科学研究院有限公司、苏交控如东海上风力发电有限公司、三峡新能源海上风电运维江苏有限公司、华能江苏清洁能源分公司、扬子石化股份有限公司。

本文件主要起草人:马君鹏、马向东、余薇、代兴亮、林光辉、王子成、章彬斌、苏俊、郑凯、周俊、曹峰、杨钢、吴胜平、吴肖、何正东、王舒涛、杨春、潘铁根、王驰、黄志祥、彭杰、周峰峰、戴飞、付志平、蒋良雄、赵占辉、陈金玉。

风电机组螺栓相控阵超声导波成像 检测技术导则

1 范围

本文件描述了风电机组螺栓相控阵柱面超声导波成像检测与缺陷评定方法。

本文件适用于外径不小于 10 mm 且不大于 100 mm、长度不大于 1 500 mm、长度与外径比值不小于 10 的碳钢及低合金钢制在役风电机组螺栓周向缺陷的不拆卸检测。风电机组其他类型和材质的螺栓周向缺陷检测以及役前检测可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB/T 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证
- GB/T 12604.1 无损检测 术语 超声检测
- GB/T 12604.13 无损检测 术语 第 13 部分:阵列超声检测
- GB/T 42399.1 无损检测仪器 相控阵超声设备的性能与检验 第 1 部分:仪器
- GB/T 42399.2 无损检测仪器 相控阵超声设备的性能与检验 第 2 部分:探头
- GB/T 42399.3 无损检测仪器 相控阵超声设备的性能与检验 第 3 部分:组合系统
- JB/T 11731 无损检测 超声相控阵探头通用技术条件

3 术语和定义

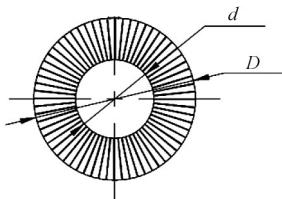
GB/T 12604.1 和 GB/T 12604.13 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

周向线阵 circumferential linear array

同一平面上多个晶片沿周向排列形成一个圆环形(控制方向)的平面阵列。

如图 1 所示。



标引符号说明:

d ——圆形晶片的内径;

D ——圆形晶片的外径。

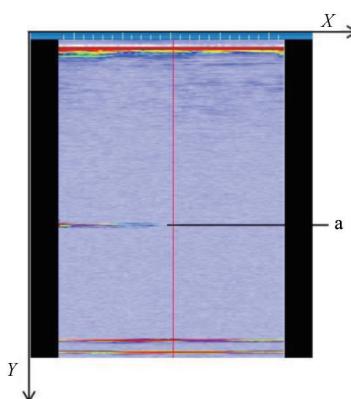
图 1 周向线阵

3.2

柱面 B 扫描图像 cylinder B scan view

以螺栓外圆周探头 1 号晶片对应位置为零点,螺栓外圆周展开长度方向为横坐标,螺栓轴向长度方向为纵坐标,形成的声场图像,并以颜色表示超声信号幅度的显示方式。

如图 2 所示。



标引符号说明:

X——螺栓外径展开方向;

Y——螺栓长度方向;

a——缺陷显示。

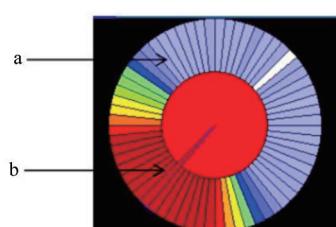
图 2 柱面 B 扫描图像示意图

3.3

柱面 C 扫描图像 cylinder C scan view

通过平面投影内部超声信号波幅方式在与螺栓检测端面平行的剖面所形成的声场图像,并以颜色表示超声信号幅度的显示方式。

如图 3 所示。



标引符号说明:

a——无缺陷区域;

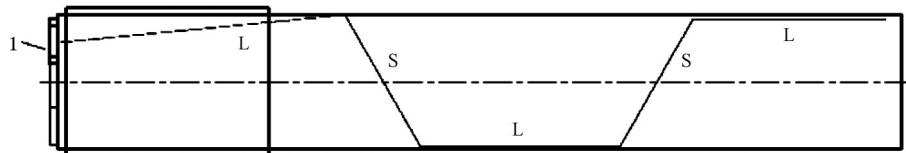
b——缺陷显示区域和方位。

图 3 柱面 C 扫描图像示意图

4 检测原理

相控阵超声柱面扫描是一种针对周向线阵超声探头的相位控制技术。该技术通过合成沿圆柱面扫描的声束实现成像显示。纵波以接近 90°的入射角在圆柱侧面产生掠射现象,其中部分纵波转换为横波,以横波折(反)射角射向圆柱对侧,在对侧的圆柱面又部分转换为纵波,如此反复。这些超声波在圆柱结构件中受圆柱面约束,沿圆柱结构件长度方向传导,即超声柱面导波,可实现远距离传输并用于检测。超

声柱面导波远距离检测原理,如图 4 所示。



标引序号说明:

1——周向线阵;

L——超声纵波;

S——超声横波。

图 4 超声柱面导波远距离检测原理

5 人员要求

检测人员应按 GB/T 9445 的要求或者合同各方同意的体系进行资格鉴定与认证。

检测人员应进行专项培训,熟悉相控阵超声导波成像检测方法,了解风电机组螺栓材料、制造和在役缺陷产生机理等相关知识,应能按规定的检测工艺要求熟练操作。

6 安全要求

从事检测的人员应遵守安全工作的有关规定,当检测条件符合安全作业条件时,方可进行检测。

7 检测工艺规程

检测工艺规程制订时应考虑表 1 所列相关因素。相关因素的变化超出规定时,应重新编制或修订工艺规程。

表 1 检测工艺规程涉及的相关因素

序号	相关因素的内容
1	螺栓信息(包括规格型号、材质等)
2	检测面状态
3	检测仪器
4	探头
5	耦合剂
6	对比试块及校准方法
7	检测覆盖范围及探头放置位置
8	灵敏度设定
9	检测结果评定
10	检测记录与报告

8 检测设备和器材

8.1 仪器设备

8.1.1 仪器

检测仪器除应满足 GB/T 42399.1 的要求外,还应满足如下要求:

- a) 工作频率为 0.5 MHz~15 MHz(按 -3 dB 测量);
- b) 接收激发通道不小于 16/64;
- c) 发射电压:不小于 50 V;
- d) 增益调节范围不小于 80 dB,最小调节步进不大于 0.1 dB;
- e) 扫查图像显示至少包括 A 扫图、柱面 B 扫描图像、柱面 C 扫描图像;
- f) 具备全程动态聚焦功能。

8.1.2 探头

探头除应满足 GB/T 42399.2 的要求外,还应满足如下要求:

- a) 探头频率范围应满足检测要求;
- b) 采用周向线阵;
- c) 探头中心频率实测平均值与标称频率值误差应不大于 10%;
- d) 探头 -6 dB 相对带宽平均值应不小于探头数据表中规定的相对带宽;
- e) 同一探头晶片间灵敏度差值应不大于 4 dB,晶片灵敏度的均匀性应满足均方差不大于 1 dB;
- f) 探头激发孔径范围内不应存在失效晶片。若失效晶片不可避免,则在确保检测灵敏度满足要求的前提下,在环阵任意 1/4 圆周范围内的失效晶片的数量不能超出激发晶片总数的 15%,且不应存在相邻的失效晶片。

8.1.3 组合性能

8.1.3.1 检测仪器和探头的组合性能除应满足 GB/T 42399.3 的要求外,还应满足如下要求:

- a) 最大检测声程处,探测 0.5 mm 人工切槽时其灵敏度余量应不小于 10 dB;
- b) 仪器和探头的组合频率与公称频率误差应不大于 10%。

8.1.3.2 当出现以下情况时应测定仪器和探头的组合性能:

- a) 新购置的仪器和探头;
- b) 仪器或探头在维修或更换主要部件后;
- c) 检测人员认为有必要时。

8.1.3.3 每隔 3 个月应按 GB/T 42399.1~GB/T 42399.3 方法对仪器、探头及其组合系统进行一次性能测试或校准。

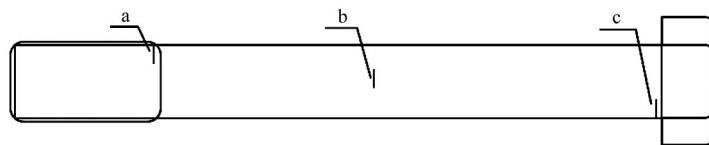
8.2 对比试块

8.2.1 检测系统调校应采用对比试块进行。

8.2.2 螺栓对比试块的直径应在被检螺栓公称直径 0.9 倍~1.1 倍范围内,应选取与被检工件声学性能相同或相近的材料制成,对比试块的结构形式和表面粗糙度应与被检螺栓相同或相近,其长度应不小于最大检测声程,该材料内部不应有大于或等于 $\phi 1$ mm 平底孔当量直径的缺陷。

8.2.3 螺栓对比试块人工缺陷为线切割槽,加工深度为直径的 2%,最小深度为 0.5 mm,宽度不大于 0.5 mm,各切割槽间隔 120° ,加工位置示意图见图 5、图 6,加工部位见表 2。在满足灵敏度等要求时,可根据检测

需要增加对比试块上刻槽数量或调整刻槽尺寸。



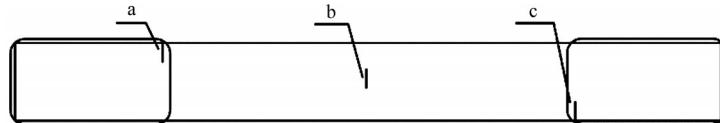
标引符号说明：

a—人工槽 1；

b—人工槽 2；

c—人工槽 3。

图 5 单头螺纹螺栓对比试块人工缺陷加工位置示意图



标引符号说明：

a—人工槽 1；

b—人工槽 2；

c—人工槽 3。

图 6 双头螺纹螺栓对比试块人工缺陷加工位置示意图

表 2 对比试块加工部位

刻槽编号		a	b	c
刻槽部位	单头螺纹	第1个螺纹根部	螺杆中间	螺杆与端头圆弧过渡处
	双头螺纹	检测端本侧螺母与垫圈结合的丝扣处	螺杆中间	检测端对侧螺母与垫圈结合的丝扣处

8.2.4 在满足灵敏度等要求时,可采用被检螺栓工件自身作为等效对比试块进行灵敏度设置。

8.3 耦合剂

8.3.1 宜采用透声性好,且不损伤检测表面的水基耦合剂。当环境温度低于 0 ℃时,耦合剂中应添加防冻液。在保证同等耦合效果情况下,也可采用其他类型耦合剂。

8.3.2 检测采用的耦合剂应与检测系统设置和校准时的相同。

9 检测准备

9.1 查阅资料

检测前应查阅被检螺栓的相关资料,主要包括:

- 名称、规格、材质及结构形式等;
- 历次检测资料。

9.2 检测面准备

影响探头与检测面耦合的锈蚀、镀锌层凸起和污物等应予以清除。

9.3 探头选择

检测前应根据螺栓规格尺寸选择合适探头。

- a) 当螺栓公称直径 $M > 20$ mm 时,探头的晶片数应不小于 64 晶片;当螺栓公称直径 $M \leq 20$ mm 时,探头晶片数应不小于 32 晶片,探头推荐频率见表 3。
- b) 探头直径应与螺栓工件匹配,探头直径与螺栓公称直径相差应不大于 10 mm,探头外径应为螺栓公称直径的 0.75 倍~1.2 倍范围,探头内径应为探头外径的 0.2 倍~0.5 倍范围,探头推荐尺寸见表 4。

表 3 探头推荐频率

螺栓长度 L /mm	$L < 200$	$200 \leq L < 1000$	$L \geq 1000$
探头频率 f /MHz	$7.5 \leq f < 10$	$5 \leq f < 7.5$	$2 \leq f < 5$

表 4 探头推荐尺寸

单位为毫米

螺栓直径	M10~M15	M15~M20	M20~M25	M25~M28	M28~M40	M40~M45
探头外径	$\phi 12$	$\phi 17$	$\phi 22$	$\phi 26$	$\phi 30$	$\phi 42$
探头内径	$\phi 3$	$\phi 6$	$\phi 10$	$\phi 12$	$\phi 12$	$\phi 12$
螺栓直径	M45~M50	M50~M60	M60~M70	M70~M80	M80~M100	
探头外径	$\phi 48$	$\phi 52$	$\phi 65$	$\phi 72$	$\phi 86$	
探头内径	$\phi 12$	$\phi 16$	$\phi 16$	$\phi 20$	$\phi 30$	

10 检测设置

10.1 扫查范围设置

扫查范围设置应至少大于被检螺栓工件长度 50 mm,声束应能覆盖到螺栓的全部被检区域。

10.2 仪器检查

每次使用前或连续工作一周以上时,应对晶片有效性按照 JB/T 11731 的规定进行测试检查。

10.3 检测灵敏度设置

10.3.1 利用对比试块设置

将检测探头放置在螺栓对比试块相应检测端,探头中心线与试块中心重合并耦合稳定,调整仪器扫描范围使底波出现在 80% 时基处,闸门起点位于 5% 时基处,闸门终点位于螺栓底波前,调节增益使柱面 B 扫描图像中三个人工刻槽信号同时清晰可见并标定颜色色标,且图像中三个刻槽的 A 扫描信号幅度均不低于满屏的 20%,再增益 6 dB 为检测灵敏度。

10.3.2 利用螺栓工件自身设置

将检测探头放置在待检螺栓检测端,探头中心线与试块中心重合并耦合稳定,调节仪器扫描范围使

螺栓底波出现在 80% 时基位置处,调节增益使底波波高达到满屏高的 80%,在此基础上增益 12 dB~18 dB,使螺栓本体噪声波(结构噪声除外)不高于满屏高 20%,记录仪器增益为检测灵敏度。若噪声波高于满屏高 20%,应使用对比试块进行调节。

11 检测实施

11.1 检测

将探头放置在被检螺栓检测端面上,探头中心线与被检螺栓中心重合,耦合良好后开始检测,检测过程中保持探头固定不动。

对所有 A 扫描信号幅度达到或超过满屏幕 20% 的相关显示信号均应确定其距检测端面的位置和最大反射波幅,并通过柱面 C 扫描图像确定其在螺栓的圆周位置。

11.2 缺陷指示长度测定

缺陷指示长度测定应采用半波高度法(—6 dB 法)。放置探头找到缺陷最强反射波,将波高调整到 80% 屏高,圆周方向移动光标,当波高降到 40% 屏高位置时进行标记;反方向移动光标至同样使波高降到 40% 屏高位置并做好标记,两标记间的距离即为缺陷指示长度。

11.3 复核

11.3.1 出现下列情形之一时,应对仪器和探头组合系统进行复核:

- 探头、耦合剂发生改变;
- 检测人员怀疑超声传播速度设置或检测灵敏度设置有变化;
- 连续工作 4 h 以上;
- 检测工作结束时。

11.3.2 检测灵敏度的复核

复核时,发现检测灵敏度与校准时相比下降超过 2 dB,则应对上一次复核以来所有检测的螺栓进行复检。

12 缺陷评定

检测到最大反射波幅大于检测灵敏度或柱面 B 扫图像中超过标定颜色色标的显示信号,当其指示长度不小于 5 mm 时,应判定为裂纹。指示长度小于 5 mm 的显示信号不判定缺陷性质,可通过拆卸方式进行辅助判断。

13 检测记录及报告

13.1 检测记录

应按照现场检测实际情况详细、客观记录检测过程的有关信息和数据。检测记录至少应包括以下内容。

- 记录编号。
- 检测工艺规程名称及编号。
- 检测对象:项目名称、工件名称、编号、规格尺寸、材质、检测部位、检测时的表面状态、检测时机。

- d) 检测设备和器材:仪器名称、规格型号和编号;探头情况(类型、标称频率、晶片尺寸、角度、编号等);试块型号;耦合剂。
- e) 检测工艺参数:检测范围、扫查位置(面、侧)、扫查方式、检测灵敏度、耦合补偿等。
- f) 检测结果:检测部位示意图;缺陷位置、尺寸、回波幅度等;缺陷的评定结果和检测结果评定。
- g) 检测人员、记录人员签字。
- h) 检测日期和地点。

13.2 检测报告

检测报告至少包括以下内容:

- a) 报告编号;
- b) 工件名称、螺栓编号、材料种类、规格;
- c) 检测仪器型号、探头、试块和检测灵敏度;
- d) 检测区域应在报告上予以表明,如有因几何形状限制而检测不到的部位,也应加以说明;
- e) 缺陷的尺寸、位置和分布;
- f) 检验结果及评定;
- g) 检验人员和审核人员签字及其等级;
- h) 检测日期。

参 考 文 献

- [1] GB/T 43480 无损检测 相控阵超声柱面成像导波检测
-