

ICS 国际标准分类号 27.180

CCS 中国标准文献分类号 F11



团 体 标 准

T/CES XXX-XXXX

风电场风轮机叶片缺陷检测系统

技术规范

Technical specification of wind turbine blades defect detection system

for wind farm

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国电工技术学会 发布

目 次

目 录	
目 次	I
前 言	II
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	3
4 系统配置	4
4.1 软件及平台	4
4.2 硬件及子系统	5
4.3 安全及性能要求	7
5 检测程序	7
5.1 检测周期	7
5.2 检测流程	7
5.3 数据处理	8
5.4 报告编制	8
5.5 档案管理	9
6 结果分析	9
附 录 A（资料性附录） 典型缺陷定级	10

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这些专利的责任。

本文件由中国电工技术学会提出。

本文件起草单位：中电华创电力技术研究有限公司、国科中检（苏州）新能源技术有限公司、中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华东电力试验研究院、挪亚检测技术有限公司、贵州电网有限责任公司电力科学研究院、保定中科新能源系统质量检测有限公司、国家电投集团广西电力有限公司、中国科学院电工研究所、西安热工研究院、中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华北电力试验研究院、深圳大疆创新有限公司

本文件主要起草人：杨建卫、刘凯、曹蓓、李海芹、张英、戴申华、王琨玥、郭红波、张鸿飞、姚柳、苏欣、黄善永、王亚顺、佟林、王尊、穆啸天、郭海涛、刘畅、杨海超、杨磊、张恩享、张建成、曹晟磊

本文件为首次发布。

风电场风轮机叶片缺陷检测系统技术规范

1 范围

本文件规定了风电场风轮机叶片缺陷检测系统的软硬件参数、系统架构、系统功能、辅助系统、检测流程及判定标准等。

本文件适用于风电场风轮机叶片缺陷检测的无人机系统技术规范。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 35018 民用无人驾驶航空器系统分类及分级

DL/T 666 风力发电场运行规程

DL/T 796 风力发电场安全规程

DL/T797 风力发电厂检修规程

NB/10594-2021 风电场无人机机巡检作业技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

多旋翼无人机 multi-rotor unmanned aerial vehicle

以多旋翼为推动方式，具有3个以上的旋翼，具有垂直起降和空中悬停功能的无人机。。

3.2

任务规划 mission planning

根据作业任务要求，通过软件对无人机飞行轨迹以及任务设备的动作进行规划。

3.3

自动返航 Automatic return

无人机完成任务或按预订策略触发返航条件后，中止当前任务，自动返回起飞点。

3.4

实时动态测量 real-time kinematic; RTK

一种全球卫星导航定位技术与数据通信技术相结合的载波相位实时动态差分定位技术，它能够实时地提供测点在指定坐标系中的三维定位结果，可在野外实时得到厘米级定位精度。RTK 工作模式分为单基站 RTK 与网络 RTK，其中单基站 RTK 适合无移动蜂窝信号区域，网络 RTK 适合有移动蜂窝（4G/5G）或自组网网络区域。

3.5

一键自动检测 automatic patrol

无人机按照预先规划的航线，在 INS/GNSS、RTK 等组合导航技术的支持下，自主执行风机叶片检测任务。

3.6

航点 waypoint

指无人机飞行轨迹的关键轨迹点，分为动作航点和辅助航点，动作航点执行拍照、录像等指令，辅助航点是为保证飞行安全而设立的过渡点。

3.7

倾斜摄影 oblique photography

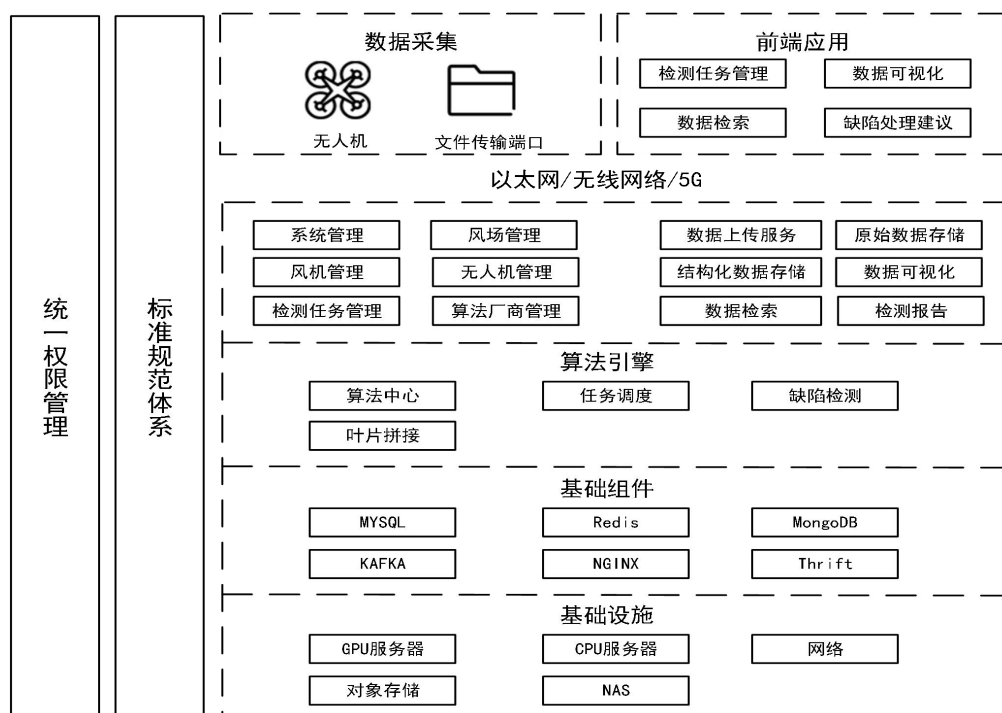
倾斜摄影技术是通过从多个不同的视角同步采集影像，获取到丰富的目标物顶面及侧面的高分辨率纹理，能够真实地反映目标物情况，获取纹理信息，生成真实的三维模型。

4 系统配置

系统由软件部分和硬件部分组成。软件部分包括无人机智能飞行系统、基于激光点云三维模型系统、地面移动站系统、缺陷识别算法系统。硬件部分包括无人机本体及荷载、系统服务器、遥控系统等。

4.1 软件及平台

无人机风轮机叶片巡检系统是无人机携带高清相机、机载电脑、激光雷达等设备，采集风轮机叶片表面影像数据，数据回传到系统平台，通过 AI 图像智能分析系统分析影像中存在的异常事件，来确定风机叶片表面存在的缺陷。系统需要建立事件驱动架构，通过低耦合的模块之间传递事件信息，并借助事件信息完成各模块间的合作。主要包含无人机智能飞行系统、基于激光点云三维模型系统、地面移动站系统、缺陷识别算法系统几个部分。



4.1.1 无人机智能飞行系统。

无人机智能飞行系统应包括无人机飞控软件、自主飞行控制软件、人工遥控软件。其中无人机飞控软件接受自主飞行控制软件和人工遥控软件的指令，控制无人机的飞行和任务设备的工作。人工遥控软件应支持数据在各个软件之间的传输。

4.1.2 基于激光点云三维模型系统

通过激光点云形成海量点集合，建立起风轮机的三维模型，形成三维空间坐标，来表示空间表面特性，从而通过激光点云可以进行三维空间内的多种量测，包括：净空距离量测、水平距离量测、垂直距离量测、坡度量测、二维面积量测、相间距离量测和最大弧垂量测等。

4.1.3 地面移动站系统。

地面移动站软件可以实现无人机在无互联网情况下的任务规划、任务执行、数据存储、设备管理等功能。各个设备数据的存储和管理，支持飞行航线规划，以及巡检飞行任务的规划和执行。

4.1.4 缺陷识别算法系统。

基于深度学习的智能诊断算法是通过组合低层特征形成更加抽象的高层表示属性或特征，通过无人机携带摄像装置获取风机叶片表面存在的缺陷，建立风电场叶片表面缺陷算法模型系统，从而可以自动识别风电场叶片表面存在的缺陷，形成数据报告。

4.2 硬件及子系统

4.2.1 无人机。

技术指标应符合 NB/T10594 中关于旋翼无人机的规定。

4.2.2 可见光云台设备。

- a) 技术指标应符合 NB/T10594 中关于旋翼无人机的规定；
- b) 应支持 4K 视频的录制。

4.2.3 激光雷达云台设备。

技术指标应符合 NB/T10594 中关于旋翼无人机的规定。

4.2.4 机载计算设备。

- a) 架构应为 x64、arm64、RISC-V 等架构；
- b) 功耗宜低于 10w；
- c) 工作温度范围为-25℃~70℃。

4.2.5 局域网路由器。

- a) 支持 2.4GHz 无线 WIFI，无线速率不低于 1000Mbps；
- b) 支持至少 16 个设备的接入。

4.2.6 系统服务器。

- a) 架构宜为 x64 架构；
- b) CPU 频率宜高于 2.7GHz，线程数宜高于 8 线程；
- c) 内存宜高于 8GB；
- d) 硬盘空间宜高于 512GB。

4.2.7 自建 RTK 系统设备。

4.2.7.1 GNSS 接收机。

- a) 平面监测精度应在 $\pm(2.5\text{mm}+0.5*10\text{D})\text{RMS}$ ，高程监测精度应在 $\pm(5\text{mm}+0.5*10\text{D})\text{RMS}$ ；
- b) 星座接收应保证全星座全频点接收，包括 GPS/GLONASS/GALILEO/BDS；
- c) 支持有线通信，包括 RS485 和 R45；
- d) IP 等级不低于 IP56。

4.2.7.2 数传电台。

- a) 发射功率不低于 20dBm；
- b) 通信距离不低于 10km；
- c) 空中速率范围不小于 0.3kbps~15.6kbps；

d) 通信接口支持 RS232。

4.3 安全及性能要求

4.3.1 风电场风轮机组叶片无人机自动检测系统的作业准备、作业实施的基本要求应符合 NB/T10594 的规定。

4.3.2 风电场风轮机组叶片无人机自动检测系统应包括无人机系统、地面移动站系统、巡检数据管理与处理系统。在无网络 RTK 的情况下，需自建 RTK 系统，保证无人机系统的定位精度。

4.3.3 风电场风轮机组叶片巡检应选用多旋翼无人机，且应搭载必须的机载运算设备，用于实现无人机的一键起飞和自主飞行，自动采集风电场风轮机组叶片的视频图像数据。

4.3.4 控制站应包括控制设备、显示设备、飞行控制软件等。

4.3.5 地面移动站系统应包括局域网路由器、电子计算机。

4.3.6 电子计算机搭载地面移动站软件，可实现包括任务规划、任务执行、数据存储、设备管理等功能。

4.3.7 数据管理与处理系统可部署在风电场本地服务器，或部署于云端服务器。应包括系统管理、基础数据管理、缺陷数据管理、算法管理等部分组成。

5 检测程序

5.1 检测周期

每年宜至少对全场风机叶片全面检测一次，根据检测结果针对有缺陷风机进行复检并跟踪相关故障情况，形成月度、季度、年度报告。

5.2 检测流程

5.2.1 环境因素确定

确定风速、风向，严禁在风速超过 8m/s 时作业，严禁在雨雪天气作业。

5.2.2 风电机组基础信息收集。

收集的基础数据应包括风电机组的编号、轮毂中心点地理坐标（经度、纬度、高程），叶片长度、塔筒高度、塔筒直径、机舱尺寸等数据。

5.2.3 风电机组姿态测量识别。

在作业过程中，通过风机的实景三维模型，系统自动对风电机组的姿态进行测量识别。实景三维模型的获取可以通过激光雷达进行点云采集实现，或者通过倾斜摄影采集高清可见光图像进行三维重建实现。测量识别的关键数据包括风电机组的偏航角，静态检测时还应包括风电机组叶片的锁定角度。

5.2.4 测量飞行航线自动规划。

根据风电机组基础信息，在地面移动站或机载计算设备上自动规划测量飞行航线。根据不同的三维重建方法，设计各个航点。

5.2.5 无人机测量飞行。

人工确认飞行航线的安全性后，无人机根据测量飞行航线进行飞行和数据采集。根据不同的三维重建方法，挂载任务设备，包括激光雷达或可见光相机。使用激光雷达时采集激光点云数据，使用可见光相机时采集可见光高清影像。在飞行过程中，应保证无人机利用 RTK 进行位置定位。测量飞行结束后无人机根据电量情况，执行悬停或返航动作。

5.2.6 无人机断点续航

无人机在航线生成后，需具备一键自动检测功能，但无人机在飞行过程中如遇障碍物、无人机故障、无人机电池电量不足或飞手终止飞行任务等情况，需要无人机具备自动返航功能，在飞手处理完相关问题，实现无人机断点续航功能。

5.2.7 风电机组实景三维模型重建。

利用点云解算软件或可见光三维重建软件，作业时实现风电机组的实景三维模型重建。重建运算可在机载计算设备进行，或在地面移动站设备进行。三维重建的成果为点云文件，存储格式为 las，精度不低于 5cm。

5.2.8 风电机组姿态测量识别

利用风电机组实景三维模型，在机载计算设备上或地面移动站设备上，进行风电机组姿态测量识别。在动态检测时，测量风电机组的偏航角。在静态检测时，测量风电机组的偏航角和叶片转角。各个角度测量精度不低于 2°。

5.2.9 风电机组叶片检测数据采集

利用风电机组姿态数据，设计动态或静态飞行航线，无人机按飞行航线飞行，进行检测数据采集。

5.2.10 飞行航线自动规划。

根据风电机组基础信息和风电机组姿态数据，在机载运算设备或地面移动站设备上，自动进行飞行航线设计。在动态检测时，航点设计为视频数据采集，无人机距离叶片不应低于 30 米。在静态检测时，航点设计为图像数据采集，需要应用倾斜摄影技术，以便采集到更加优质的图像数据，无人机距离叶片根据任务设备属性，宜保持在 10 米至 20 米之间。

5.2.11 无人机飞行航线。

航线生成需要人工确认飞行航线的安全性，无人机再执行相关航线的飞行任务，以及数据采集。

5.3 数据处理

无人机完成检测飞行后，利用地面移动站设备，将检测数据上传至数据管理与处理系统。数据管理系统应具备叶片区域分类、图像数据裁剪、图像数据拼接等功能。

5.4 报告编制

系统利用人工智能技术，自动对数据进行分析 and 缺陷识别，自动生成叶片缺陷检测报告，报告内容包含但不限于：

5.4.1 检测过程中各种环境信息

5.4.2 缺陷识别（标记过的图片）

5.4.3 缺陷在叶片上精准定位

5.4.4 缺陷按危险等级进行分类

5.4.5 缺陷类型统计以及分布

5.4.6 缺陷形成原因分析

5.5 归档管理

无人机采集完风机相关数据，数据需要关联到相关风轮机组以及叶片，相关检测报告应归档。。

6 结果分析

6.1 应按照叶片缺陷等级、缺陷内容、严重程度进行定性及定量的分析（参考附录 A）；

6.2 应对缺陷的形成原因进行分析，并判断缺陷的劣化趋势，防止设备事故的发生。

附 录 A
(资料性附录)
典型缺陷定级

A.1 缺陷等级表

缺陷分类	缺陷内容	缺陷等级	备注
结构损坏	指叶片主体结构断裂，梁帽断裂，叶根合模粘结面开裂，最大玄长贯通性开裂等严重等级最高损伤，已经无法继续运转，主体结构已经受损。	I	自动识别 查全率：>90%； 查准率：>90%
叶片雷击	指叶片任何部位受到雷击，导致复合层损坏，区域结构受影响，如不及时处理，大概率会造成损伤范围扩大严重程度加深。造成不必要的成本产生。	II	自动识别 查全率：>90%； 查准率：>90%
复合层损伤	指叶片任何部位受到外力碰撞，挤压等造成的叶片复合层损伤。一般在叶片运输，吊运，安装的过程中会发生此类损伤。也会导致区域结构受影响，有延伸扩大的可能性。	II	自动识别 查全率：>90%； 查准率：>90%
叶片开裂	损伤指叶片前后缘壳体粘结面开裂。此类损伤直接影响叶片的粘结构，会在较短时间内开裂区域持续延长，增加维修费用，严重可能会导致叶片无法修复直接报废	II	自动识别
胶衣裂纹	损伤一般无法通过外部照片确认内部复合层是否损伤，以及内部损伤程度。如果不处理，可能存在内部复合层延申加重的趋势，导致形成重大损伤。	III	自动采集
表面腐蚀	损伤一般指叶片尖部前缘腐蚀，此类损伤因为叶尖前缘在复杂的自然工况下高速切风所导	III	自动采集

	致。会导致前缘胶衣脱落，或者前缘加强层玻纤布块状脱落。随着时间延长，严重程度肯定会呈线性增长。		
胶衣脱落	损伤指叶片复合层（玻纤布）外部的一层保护层胶衣脱落，但没影响到玻纤布。此类损伤不影响叶片结构。	III	自动采集
前缘保护膜损伤	指叶片叶尖区域前缘保护膜鼓包，破裂，脱落的损伤，同时底部胶衣完好，叶片未受损伤	IV	自动采集
表面污染	损伤指叶片外表面存在较集中杂质污染，多由叶根轴承油脂甩出掉落叶片，或自然界中杂质导致。油脂可能会腐蚀胶衣，但周期非常长。所以此类缺陷并不会影响结构及性能	IV	自动采集
附件脱落/损坏	损伤指粘结在叶片上的一些增功率或者减小噪音的功能性附件，比如涡流发生器，涡流板，襟翼等，发生脱落。可能会影响叶片性能及功能效果。但对叶片本身结构短期不会有太大影响。	IV	自动采集
表面掉漆	损伤指叶尖区域警示油漆脱落，不涉及胶衣范畴，属非常轻微损伤。	IV	自动采集