风力发电叶片运行状态监测与故障诊断技术近况

赵亚峰
国华蒙东（内蒙古）新能源有限公司　内蒙古通辽　028000

【摘　要】近年来，我国对电能的需求不断增加，风力发电工程建设越来越多。目前，风电设备正在朝着大型化的方向发展，其中风力发电叶片尺寸也变得越来越大。叶片在工作过程中，需要适应周围变化的环境以及其承担的负载，叶片在工作过程中可能会发生故障问题，比如分层、磨损等，这些问题的出现就会让叶片在性能以及结构方面出现一定的破坏。为此，应当加强对叶片状态监测，做好故障诊断，保证叶片的正常运行，减少风力发电机组的运行成本。本文就风力发电叶片运行状态监测与故障诊断技术进行研究，以供参考。

【关键词】风力发电；叶片状态；故障诊断

Recent status monitoring and fault diagnosis technology of wind turbine blades

Zhao Yafeng
Guohua Mengdong (Inner Mongolia) New Energy Co., Ltd　Tongliao, Inner Mongolia　028000

【Abstract】In recent years，the demand for electric energy has been increasing in our country，and the construction of wind power projects has become more and more.At present，wind power equipment is developing in the direction of large-scale，including wind power blade size is becoming larger and larger.In the working process，the blade needs to adapt to the changing environment around it and the load it bears.The blade may have fault problems during the working process，such as stratification，wear，etc.The appearance of these problems will cause certain damage to the blade in terms of performance and structure.Therefore，we should strengthen the monitoring of blade condition，do a good job of fault diagnosis，ensure the normal operation of the blade，and reduce the operating cost of the wind turbine.In this paper，the operating condition monitoring and fault diagnosis technology of wind turbine blades are studied for reference.

【Key words】wind power generation；Leaf state；Fault diagnosis

引言

随着“碳达峰”、“碳中和”相关政策的实施，新能源的发展受到越来越多的关注和重视，风力发电作为一种资源分布广且量多的新能源，有着一定的开采价值。近十年来我国风机装机容量持续增长，2022 年新增装机达 5000 万千瓦。为保证风力发电系统的正常运行，需要考虑到各种危害风机运行的因素，其中叶片的振动造成的危害不容小视。叶片在外加荷载变动、失速或是自身机械结构等因素作用下可能产生振动，长期振动会缩短风机的使用寿命，如果引起共振还可能使叶片断裂，影响整个系统的正常运行，因此有必要研究如何消除振动。

1 叶片性能评估与问题分析

某风电场作为所在地区的重要清洁能源基地，其运行效率的提升对于满足日益增长的电力需求具有重要意义。通过采集叶片在运行中的振动数据、风能利用率以及磨损情况等关键指标，发现该风电场叶片存在叶片磨损严重的问题，平均每年磨损率达 5%，导致叶片使用寿命缩短，维护成本增加。针对这些问题进行深层次剖析，一方面，由于叶片设计不够优化，风源条件不能完全适应当地的翼型、弦长等参数，造成风能捕捉效率不高。另一方面，叶片材质的耐磨性较差，容易受到自然环境的侵蚀，如风沙、雨水等，使叶片经过长

时间的运转而加剧磨损程度。

2 造成叶片机械损伤的原因

2.1 因操作疏忽

运输、吊装的时候发生故障。在进行运输时，叶片尖端可能会受到风沙和植物的影响从而出现破坏，在进行吊装时，叶片一些薄弱的位置可能会受到吊绳夹具的影响出现故障。

2.2 疲劳损伤与动力响应分析

低压缸叶片在频繁的启停操作中受到的疲劳损伤和其动力响应是评估其整体性能和寿命的关键因素。疲劳损伤主要是由于反复施加的载荷而导致材料逐渐退化，特别是在叶片材料承受循环应力时。动力响应分析涉及叶片在变化的载荷下的振动行为，这些振动能够诱发或加剧疲劳裂纹的形成。

3 叶片状态监测与故障诊断方法

3.1 技术准备

人员培训、难点分析。组织作业人员学习《金风 1500kW 风力发电机组安装手册》，了解风机部件构造及工作原理，分析在设备拆除过程中的施工难点，提出解决方案。踏勘现场，根据现场吊装环境，制定切实可行的施工方案，施工方案报监理、业主审核批准后，对各班组作业人员进行详细的安全技术交底。

3.2 叶片材料与设计的优化

通过选用更加耐高温和抗疲劳的材料以及改进叶片结构设计，能够有效提高叶片的耐久性和操作效率。在叶片的结构设计上，采用先进的计算流体力学和有限元分析工具，对叶片的流动特性和应力分布进行优化，可以确保在叶片设计阶段就最大限度地减少流体动力学和热力学负载引起的潜在疲劳点。通过优化叶片的几何形状，如调整叶片弯曲和扭转角度，可以改善蒸汽流过叶片时的压力分布，从而降低在高速运转中产生的振动幅度，减少因振动引起的疲劳损伤。同时，应用表面处理技术如涂层和表面强化处理也是提高叶片耐用性的有效方法。通过在叶片表面施加陶瓷或金属涂层，不仅可以提高其耐腐蚀和抗氧化性能，还可以通过表面强化提高其抗磨损能力，这对于在含有杂质的蒸汽环境中运行的叶片尤其重要。

3.3 技术方案设计

多种叶片提效改造技术方案是在上述评估分析结果的基础上，综合考虑技术可行性、性价比和实施难度等因素设计而成。利用先进空气动力学软件对叶片翼型进行优化设计，通过调整翼型曲线和弦长分布，使叶片能够更好地适应不同风速和风向条件，从而提高了平均风能利用率，对风电场的发电效率有显著改善作用。为应对叶片磨损严重的状况，采用新型耐磨复合材料替代原有的叶片材料，这种复合材料具有优异的耐磨性和抗腐蚀性能，能够很好地抵抗自然环境中的沙粒和雨水的侵蚀。经过实际测试发现，与传统叶片材料相比，新型复合材料的耐磨性有明显的提高，延长了叶片的使用寿命。在叶片上安装智能传感器和监控系统，实时监测叶片运行状态的各种参数，并将数据传输到中央控制系统进行分析处理，从而发现问题并做出相应的预警处理，使叶片运行状态得到有效的维护和监控。同时，监测系统还能对叶片的运行数据进行采集分析，为后续的维护管理提供有力的数据支撑。经过叶片提效改造后，不仅提高了风力发电场的运行效率，还提高了风力发电的发电量。另外，由于新型耐磨材料的应用和延长叶片的使用寿命，使风力发电场的运行稳定性和可靠性得到了提高。再加上智能监测系统的安装，使该风力发电场对叶片运行中出现的问题能够及时发现并加以解决，从而使该风力发电场的运行效率得到进一步的提升。

3.4 基于多域特征与信息融合的叶片裂纹故障诊断方法

基于多域特征与信息融合的叶片裂纹故障诊断方法主要步骤如下：①利用布置在离心风机不同位置的多个加速度传感器获取加速度信号，对各传感器采集信号分别提取时域、频域、循环域和时频域特征，构建多域特征集；②使用包括 Laplacian 分数、随机森林、ReliefF 算法、互信息和信息增益的多准则特征选择方法，对初始特征集中各特征进行评估，得到对应的分数向量，并采用改进 DST 方法进行融合处理，筛选出特征分值高于平均值的特征，构建敏感特征子集；③采用 MA-KPCA 方法对多个敏感特征子集进行融合，实现多传感器下叶片裂纹故障的特征提取，结合极限学

习机（ELM）分类器完成叶片裂纹的故障诊断。

3.5 信号降噪方法

滤波可以对振动信号进行有效处理，其主要目的是对采集的振动信号频谱进行改造，获取其中有价值的信息，抑制无用的信息或频率成分。工程中的振动信号往往存在较多噪声或正常设备运行特征，会将故障特征淹没，于是需要对原始振动信号进行滤波处理。频域数字滤波是数字滤波的一种，主要对离散时间信号进行处理，适用于数据长度较大的信号。其基本原理是：对原始振动信号进行傅里叶变换，得到对应的频谱，将频谱中不需要的频率成分置零，然后求傅里叶逆变换，得到滤波后的信号。正常叶片与故障叶片的原始信号上无明显区别，在滤波之后，故障叶片的周期性冲击特征比较明显。对上述正常叶片和故障叶片之间的部分特征进行计算。其中变化率的计算方式为故障叶片特征与正常叶片特征之间的差值与正常叶片特征之比。原始信号中，故障叶片比正常叶片的特征值更低，但是并没有低很多，这是由于工况影响；在进行滤波之后，故障叶片部分特征明显比正常叶片特征高，有的甚至高出 1 倍及以上，表示叶片已经出现故障。

3.7 高速旋转叶片裂纹

为了能够实现更精准的测量以及防止因传感器故障导致无法有效辨识叶片振动参数。将高速旋转试验台安装完成后，开展转子叶片旋转试验，关注其共振状态下的测量结果。实际服役工况产生的裂纹主要由内部缺陷导致的疲劳裂纹，实际裂纹故障难以捕捉，且裂纹微小，而使用线切割技术加工裂纹与实际裂纹相差很大，为了更加逼近真实工况，开展了疲劳裂纹试验。将模拟转子叶盘拆卸并安装在 5 吨 2.5KHz 振动台上，对二号叶片进行疲劳裂纹试验，施加 455MPa 的应力，由于是整体叶片，需要将其他叶片通过胶带两两固定以增大其振动阻尼，压制其他叶片振动。通过 optoNCDT 激光位移传感器实时测量二号叶片振动固有频率，精度 ± 10m，测量频率范围 0~4kHz，施加高水平激励，大约 10 分钟后，观测到该叶片固有频率明显下降，终止振动台疲劳试验，取下转子叶盘，使用渗透探伤剂对二号叶片进行探伤，当渗透探伤剂进入裂纹后会在叶片表面形成明显的颜色变化，通过探伤观测出长约 4mm 的裂纹。最后将有裂纹叶片的整体叶盘重新安装到高速旋转试验台上，采用相同的叶尖定时传感器周向角度布局，以及相同的升降速试验方案。

3.8 叶片寿命预测与健康管理模块

叶片寿命预测与健康管理模块的作用是通过对叶片状态数据的深入挖掘和分析，实现对叶片剩余使用寿命的精准预测和健康状态的实时评估，为风电机组的预测性维护提供决策支持。该模块主要由高性能计算集群和大容量存储阵列组成。其中：计算集群采用双路 Intel Xeon Platinum 8380HL 处理器，单节点物理内核数高达 64 个；存储阵列采用混合架构，由 1TB 固态硬盘（Solid State Disk，SSD）和 10TB 机械硬盘（Hard Disk Drive，HDD）构成，可提供高达 1 PB 的存储容量和 5GB・s^{-1} 的输入 / 输出（Input/Output，I/O）吞吐能力。

结语

为了提升风电场生产效率和质量，需要分析风力发电机组运行故障的类型，从而制定可行、有效的发电机运行维护策略，降低故障发生概率。风电场在环保方面做出的积极贡献，体现在二氧化碳减排量的增加和有害物质排放量的降低上。在提高风电场运行效率和经济效益的同时，成功实施叶片提效改造，为风电产业的可持续发展提供了有益的探索和借鉴。

参考文献

[1]龙霞飞，杨苹，郭红霞，伍席文.大型风力发电机组故障诊断方法综述[J].电网技术，2017，41（11）：3480-3491.

[2]姜海蓉，王研艳，杨明.风力发电机设计与研究综述[J].江苏科技信息，2017，（17）：44-48.

[3]金晓航，孙毅，单继宏，吴根勇.风力发电机组故障诊断与预测技术研究综述[J].仪器仪表学报，2017，38（05）：1041-1053.

[4]陆元明，张乃正.风力机叶片裂纹在线监测系统[J].电工技术，2017，（04）：83-84.