

# 基于状态监测的风力发电机预防性维护实践

邢乐乐

国电电力内蒙古新能源开发有限公司 内蒙古 呼和浩特 010000

**摘要：**本文探讨了基于状态监测的风力发电机预防性维护实践，介绍了风力发电机状态监测技术的原理，详细阐述了振动监测、温度监测等关键技术。文章分析了风力发电机状态监测系统的构成与功能，包括传感器选择与布置、数据采集与传输、数据处理与分析软件以及远程监控平台等。提出了基于状态监测的预防性维护策略，包括阈值设定、维护周期优化、关键部件维护措施以及维护任务优先级排序等，为风力发电机的稳定运行提供有力保障。

**关键词：**风力发电机；状态监测；预防性维护

## 1 风力发电机状态监测技术的原理

风力发电机状态监测技术依赖高精度传感器网络实现设备健康度评估。以某风电场320台1.5MW风机为例，其状态监测系统年均采集振动数据超1.2亿条，温度数据8600万条。系统通过安装于齿轮箱（加速度传感器灵敏度100mV/g）、发电机（PT100温度传感器精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ）等关键部位的传感器，实时捕捉设备运行参数。数据经4G/5G网络传输至云端平台，采用FFT算法进行频域分析，当振动频谱中100Hz以上高频分量占比超过35%时触发预警。实践表明，该技术可提前3-6个月发现轴承早期磨损，故障预判准确率达89%<sup>[1]</sup>。

## 2 风力发电机状态监测的关键技术

### 2.1 振动监测与分析

振动监测是齿轮箱故障诊断的核心手段。某风电场

统计显示，齿轮箱故障占风机停机事件的42%，其中轴承磨损占比达67%。采用IEPE振动传感器（频率响应0.5-10kHz）监测显示，正常齿轮箱振动加速度有效值 $< 5\text{m/s}^2$ ，当超过 $8\text{m/s}^2$ 时需排查齿轮啮合问题。某2MW风机在运行第38个月时，其高速轴振动频谱出现230Hz特征频率（对应轴承外圈故障频率），经拆解验证存在滚道点蚀，及时维修避免了35万元的更换成本。

### 2.2 温度监测与热成像技术

发电机定子温度是评估绝缘寿命的关键指标。某型号双馈发电机绝缘等级为F级（极限温度 $155^{\circ}\text{C}$ ），当定子绕组温度超过 $120^{\circ}\text{C}$ 时，绝缘寿命按Arrhenius定律每升高 $10^{\circ}\text{C}$ 减半。热成像检测显示，某风机因冷却风扇故障导致定子局部温度达 $135^{\circ}\text{C}$ ，较正常机组高出 $22^{\circ}\text{C}$ ，及时处理后使绝缘寿命延长4-6年。温度监测数据见表1：

| 监测部位      | 正常范围（ $^{\circ}\text{C}$ ） | 预警阈值（ $^{\circ}\text{C}$ ） | 故障阈值（ $^{\circ}\text{C}$ ） | 典型故障案例      |
|-----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------|
| 齿轮箱油温     | 40-80                      | 85                         | 95                         | 油液污染导致散热不良  |
| 发电机定子     | 60-110                     | 115                        | 130                        | 绕组匝间短路      |
| 变流器IGBT模块 | 50-90                      | 95                         | 105                        | 散热片积灰影响冷却效果 |

### 2.3 油液分析与磨损监测

油液作为齿轮箱健康状况的“血液”，其成分变化与齿轮箱磨损程度存在强关联性。据行业统计，齿轮箱故障导致的非计划停机占风力发电机组总故障停机的38%，而其中65%的故障可通过油液分析提前预警。对150台运行超3年的风机进行年度油液检测，数据显示当铁含量 $> 50\text{ppm}$ 时，齿轮箱发生故障概率较正常状态提升3.2倍；当铜含量 $> 30\text{ppm}$ 时，轴承及轴系磨损风险显著增加。在实际监测中，某2MW风机在第4个监测周期（每季度1次）发现油液铁含量从28ppm骤升至65ppm，铜含量连续3个月以18ppm/月的速率增长，光谱分析显示Cu元素占比达6.8%（正常水平 $< 1.2\%$ ）。进一步采用铁谱分

析技术，在显微镜下观察到大量疲劳磨损金属颗粒，最终确诊为高速轴轴承保持架磨损。若未及时干预，该故障可能导致齿轮箱整体失效，预估维修成本将从早期处理的15万元攀升至80万元。目前主流运维方案采用离线油液检测与在线颗粒度监测相结合的方式。离线检测包含粘度、酸值、水分等理化指标测试，以及光谱、铁谱分析，可精准识别磨损颗粒来源；在线监测采用 $5\mu\text{m}$ 精度的颗粒计数器，实时监测油液中颗粒浓度及尺寸分布<sup>[2]</sup>。某风电场应用该组合方案后，齿轮箱早期故障发现率从30%提升至40%，故障平均处理时间从72小时缩短至24小时，年度维护成本降低22%。通过建立油液数据趋势模型，还可提前6-12个月预测关键部件剩余寿命，为预防性

维护提供量化依据。

2.4 声发射监测与超声波检测

声发射技术在叶片裂纹检测中展现出独特优势。研究表明，3MW风机叶片在12m/s风速下，正常运行时声发射信号幅值 < 40dB，当出现0.5mm微裂纹时，信号幅值可达65dB以上。某海上风电场部署8通道声发射阵列（采样率1MHz），通过时差定位算法，成功在运行第3年定位某叶片后缘1.2m长裂纹，较传统目视检测提前14个月发现隐患。若该裂纹持续扩展，可能导致叶片断裂，预估损失超200万元。在齿轮箱检测领域，超声波检测技术通过分析声压级变化实现齿轮磨损量化评估。实测数据显示，当齿轮箱内部声压级 > 85dB时，齿轮磨损量 > 0.1mm的概率达78%。某风电场对200台风机开展季度性超声波检测，检测耗时仅为传统拆解检查的1/10。通过频谱分析技术，可进一步区分齿轮磨损类型：高频段异常（> 10kHz）对应齿面磨损，低频段异常（< 1kHz）则指示齿根裂纹。某风机检测发现声压级异常升高至88dB，结合频谱特征诊断为低速级齿轮齿面磨损，及时更换后避免了传动系统连锁故障。两种技术结合使用，可将关键部件缺陷检测准确率提升至92%。

2.5 电气信号监测与分析

电气信号异常是发电机潜在故障的重要表征。对双馈发电机的长期监测数据显示，当定子三相电流不平衡度 > 5%时，匝间短路风险增加2.7倍；电压谐波畸变率（THD）每升高1%，绝缘老化速度加快15%。某1.5MW风机运行中出现三相电流不平衡度达7.2%，THD升至8.5%（正常 < 5%），FFT分析显示11次谐波分量异常突出。经拆解发现转子笼条存在3处断裂，若未及时处理，可能引发发电机烧毁，预估损失超50万元。现代电气监测系统采用16位ADC（采样率10kHz），可捕捉0.1%的电流波动。某智能监测装置实测数据表明，其对发电机空载、负载工况下的参数监测误差 < 0.3%。通过构建包含电流频谱、电压相位、功率因数等12项指标的故障诊断模型，可实现对定子绕组短路（准确率91%）、转子断条（准确率88%）、绝缘老化（准确率85%）等典型故障的智能识别。某风电场部署该系统后，电气故障平均处理时间从48小时缩短至12小时，设备可利用率提升3.2%，年发电量增加18万度，经济效益显著。

3 风力发电机状态监测系统的构成与功能

3.1 传感器选择与布置

传感器布置方案直接影响监测效果。某风电场对比试验显示，齿轮箱三点布置（高速轴、中间轴、低速轴）较单点布置故障识别率提升22%。具体布置见表2：

| 监测部位  | 传感器类型      | 精度       | 采样频率  | 布置数量 |
|-------|------------|----------|-------|------|
| 齿轮箱   | 三轴加速度传感器   | ±1%FS    | 10kHz | 3-4个 |
| 发电机定子 | PT100温度传感器 | ±0.5℃    | 1Hz   | 6-8个 |
| 叶片    | 声发射传感器     | 35-100dB | 1MHz  | 4-6个 |
| 变流器   | 霍尔电流传感器    | ±0.5%    | 1kHz  | 3个   |

3.2 数据采集与传输技术

数据采集与传输技术作为连接传感器与监控平台的核心纽带，其性能直接影响监测系统的实时性与可靠性。在数据采集环节，某型号智能采集模块采用24位ADC芯片，可将振动传感器输出的模拟信号转换为分辨率达0.1mg的数字信号，相较于传统16位ADC，数据精度提升64倍，有效降低微弱故障信号的漏检率。在预处理阶段，通过巴特沃斯低通滤波器对原始信号进行处理，可将50Hz工频干扰抑制30dB以上，确保数据信噪比达到90dB，满足高精度分析需求。传输技术的选择需兼顾传输效率与环境适应性，某内陆风场对比实验显示，光纤传输在10km范围内可实现10Gbps带宽、低于1ms的传输延迟，数据丢包率低于0.01%，但每公里铺设成本高达8万元；5G传输在覆盖范围内平均带宽150Mbps，延迟约30ms，年运营成本约为光纤的1/5，但在强电磁干扰环境下数据误码率会上升至0.5%。LoRa技术虽带宽仅50kbps，但其-148dBm的超高灵敏度使其在山区环境中传输距离可达15km，适用于传感器状态参数的低频传输。某沿海风场采用5G+光纤混合组网方案后，振动数据传输成功率从95.2%提升至99.8%，平均延迟从58ms降至32ms，满足齿轮箱故障高频监测需求<sup>[3]</sup>。

3.3 数据处理与分析软件

数据处理与分析软件作为系统的“智能中枢”，其算法性能直接决定故障诊断准确率。某商用分析平台采用SparkStreaming框架，在处理320台风机每秒产生的2000条数据时，可实现10万条振动数据的FFT分析耗时仅28秒，较传统单机处理效率提升12倍。在算法优化方面，平台集成的自适应阈值算法通过对历史数据的机器学习，可将齿轮箱振动预警阈值的动态调整误差控制在±5%以内，较固定阈值模型的漏报率降低40%。实际应用中，该平台对某风电场3年数据的分析显示，其振动频谱分析算法对轴承内圈故障的识别准确率达92.3%，温度趋势预测模型的均方根误差仅为1.2℃。通过关联分析模块，可自动识别12类复合故障模式，如“振动异常+油温升高+电流波动”组合触发的齿轮箱润滑失效预警，较单一参数监测提前72小时发现隐患。软件生成的可视化报表支持每日自动推送，运维人员获取关键信息的效率提升60%，故障诊断响应时间从平均4.2小时缩短至1.8小时。

### 3.4 远程监控与故障诊断平台

远程监控与故障诊断平台是风力发电机状态监测系统的最终呈现环节。该平台通过图形化界面展示设备的运行状态和故障信息,支持实时数据查询和历史数据回放等功能。运维人员可以通过该平台远程监控风力发电机的运行状态,及时发现并处理故障。故障诊断平台则运用先进的故障诊断算法和专家系统,对接收到的数据进行分析 and 处理,自动识别和诊断设备的故障类型和位置。该平台还能够提供故障预警和维修建议,为运维人员提供科学的决策支持。

## 4 基于风力发电机状态监测的预防性维护策略制定

### 4.1 监测数据的阈值设定与故障预警机制

在制定预防性维护策略时,首先需要为风力发电机的关键监测参数设定合理的阈值。这些阈值通常基于设备的正常运行范围、历史故障数据以及行业标准来确定。当监测数据超过设定的阈值时,系统应自动触发故障预警机制,及时通知运维人员进行检查和处理。故障预警机制应具备实时性、准确性和可靠性,能够迅速识别潜在故障并发出预警信号。为了实现这一目标,可以采用先进的算法和模型对监测数据进行智能分析,提取故障特征并预测故障发展趋势。同时,还应建立故障预警的响应流程和应急预案,确保运维人员能够迅速响应并采取有效措施。

### 4.2 维护周期的确定与优化

基于状态监测的预防性维护策略强调根据设备的实际运行状态来确定维护周期,而非传统的固定周期维护。通过对监测数据的持续分析,可以识别设备的退化趋势和潜在故障点,从而提前制定维护计划并优化维护周期。在确定维护周期时,需要考虑多个因素,包括设备类型、运行环境、历史故障记录以及维护成本等。通过综合运用数据分析、专家经验和维护经验,可以制定出更加科学合理的维护周期计划。此外,随着设备的运行和监测数据的积累,还应不断对维护周期进行优化和

调整,以确保维护策略的有效性和适应性<sup>[4]</sup>。

### 4.3 维护任务的优先级排序与资源分配

在制定预防性维护策略时,还需要考虑维护任务的优先级排序和资源分配问题。由于风力发电场通常包含多台设备且分布广泛,因此运维人员需要在有限的时间内合理分配资源,确保关键设备和紧急故障得到及时处理。为了实现这一目标,可以采用风险评估方法对维护任务进行优先级排序。通过综合考虑设备的重要性、故障影响程度以及维修紧迫性等因素,可以确定各项维护任务的优先级顺序。同时,还应根据运维人员的数量和技能水平,合理调配资源,确保维护任务的顺利执行。为了进一步提高资源利用率和维护效率,可以采用智能化调度系统和远程监控技术,实现维护任务的自动派发和远程指导。通过这些手段,可以确保风力发电机得到及时有效的维护保障,提高设备的可靠性和稳定性。

### 结束语

综上所述,基于状态监测的风力发电机预防性维护实践对于提高设备运行效率、延长使用寿命具有重要意义。随着技术的不断发展,未来状态监测技术将更加智能化、精准化,为风力发电行业的可持续发展注入新的活力。同时,运维人员应不断提升专业技能,合理利用监测数据,制定科学合理的维护策略,确保风力发电机安全稳定运行。

### 参考文献

- [1]汪玉玲.风力发电机状态监测和故障诊断技术的研究[J].现代工业经济和信息化,2022,12(11):2.
- [2]石港,王伟,雷志鹏等.风力发电机组状态监测与故障诊断研究综述[J].山西电力,2023(01):43-46.
- [3]杜应军,李辉航,李东毅,刘术,陈玉杰.风力发电机组故障诊断系统研究[J].自动化应用,2021(11):127-130.
- [4]魏协奔,卢旭锦,孙培明,李童彬.浅析风力发电机组振动状态监测与故障诊断[J].中国设备工程,2021(15):142-143.