

热动新能源风电设备故障预测与安全管理

张贵雲

大唐海投（台州）发电有限责任公司 浙江 临海 317000

摘 要：风电设备运行中，机械部件故障涵盖齿轮箱磨损、轴承振动异常等；电气部件故障包括发电机绝缘劣化、变流器芯片损坏等；控制系统故障涉及传感器信号失真、软件逻辑错误等；环境诱发故障有极端天气过载、空气污染腐蚀等。本文提出基于物理模型、数据驱动及混合预测方法，结合人员、设备、环境安全管理策略，构建信息共享、风险预警与持续改进的协同机制，为风电设备稳定运行提供支撑。

关键词：风电设备；故障预测；安全管理；协同机制

引言：随着热动新能源风电产业的快速发展，风电设备规模持续扩大，其运行稳定性成为保障能源供应的关键。风电设备长期暴露于复杂环境，承受交变载荷、极端天气及空气污染等多重影响，机械、电气、控制系统故障频发，不仅导致维修成本攀升，更可能引发停机事故，影响电网安全。因此，深入分析风电设备故障类型与特征，研发精准预测技术，构建系统化安全管理策略，形成故障预测与安全管理的协同机制，对提升风电设备运行可靠性、降低全生命周期成本具有重要意义。

1 风电设备常见故障类型及特征

1.1 机械部件故障

齿轮箱作为风电设备动力传输的核心组件，长期运行中易出现多种故障模式^[1]。其中磨损是典型特征之一，由于齿轮啮合过程中持续承受交变载荷，齿面金属逐渐脱落形成磨粒，导致传动精度下降并伴随异常噪声。密封失效引发的泄漏问题同样普遍，密封件在高温、高速旋转环境下老化变硬，失去弹性后无法有效阻隔润滑油外溢，不仅造成资源浪费，更可能因润滑不足加速齿轮磨损。轴承故障的表征具有多维性。振动幅值增大是直观信号，当滚道出现点蚀或保持架损坏时，旋转部件的不平衡力会激发特定频率的振动分量。温度异常升高则是内部摩擦加剧的直接反映，润滑脂变质或游隙超标会导致金属直接接触，局部温升可能超过设计阈值。一般而言，轴承正常工作温度在60 - 80℃，当温度超过90℃时，就可能存在故障隐患。叶片故障的成因与材料特性密切相关，复合材料层间结合强度不足易引发分层剥落，而气动载荷长期循环作用则可能导致结构开裂，这类损伤通常从叶根应力集中区域开始扩展。

1.2 电气部件故障

发电机故障多源于绝缘系统劣化。绕组在交变电磁场作用下，绝缘材料逐渐失去介电强度，最终引发匝间

短路或相间击穿。定子铁芯松动造成的振动会加速绝缘磨损，而转子导体断裂则可能导致磁场畸变，引发整机振动超标。变流器故障与电力电子器件特性紧密相关，IGBT模块在开关过程中承受电压电流尖峰，过热或过压工况易造成芯片损坏，导致直流侧过流或交流侧电压失衡。电缆故障呈现渐进性特征。绝缘介质在电热联合作用下发生化学降解，介质损耗角正切值增大导致局部放电，最终形成贯穿性击穿通道。过载运行引发的导体温升会加速绝缘老化，而机械应力造成的绝缘层开裂则为水分侵入提供路径，形成恶性循环。

1.3 控制系统故障

传感器故障表现为输出信号失真。温度传感器漂移会导致冷却系统误动作，振动传感器零点偏移可能掩盖真实故障特征，而位置传感器信号中断则会触发保护停机。硬件故障通常伴随物理损伤痕迹，电路板焊点虚接或元器件击穿会直接中断信号传输路径。软件故障则具有隐蔽性，程序逻辑错误或参数配置不当可能引发控制指令错乱，在特定工况下导致设备误动作或保护拒动。

1.4 环境诱发故障

极端天气对设备构成持续性挑战。强阵风可能使叶片瞬时过载，超出材料疲劳极限，而低温环境会导致润滑油粘度骤增，齿轮箱启动阻力增大^[2]。高温工况下，发电机绕组温升接近绝缘材料耐热等级上限，长期运行将缩短设备寿命。空气污染引发的腐蚀问题具有区域性特征，沙尘环境中的颗粒物会加速机械部件磨损，而沿海地区的盐雾沉积则在电气接点处形成导电膜，引发微电弧放电和接触电阻增大。

2 风电设备故障预测技术

2.1 基于物理模型的预测方法

风电设备物理建模技术通过构建精确的数学描述来模拟设备运行特性。动力学方程模拟聚焦于机械系统动

态响应分析,针对齿轮箱传动链、叶片气弹耦合等关键结构,建立包含质量、刚度、阻尼参数的多自由度振动方程,通过数值求解获取设备在复杂载荷作用下的位移、速度及加速度分布。这种建模方式能够揭示故障演化的物理本质,例如通过模拟齿轮啮合过程中齿面接触应力变化,可预测点蚀故障的萌生位置与发展速率。故障机理研究则侧重于解析故障发生的临界条件,针对轴承滚道疲劳、发电机绝缘击穿等典型失效模式,结合材料力学、电磁场理论构建失效判据,通过参数敏感性分析识别影响设备可靠性的主导因素。此类方法在早期故障识别中具有独特优势,能够通过物理约束条件过滤掉数据噪声引发的误报,但模型精度高度依赖边界条件设定的准确性,对复杂工况的适应性存在一定局限。

2.2 基于数据驱动的预测方法

数据采集系统通过部署在设备关键部位的传感器网络,持续获取温度场、振动谱、电气参数等多维度运行数据。预处理环节采用滑动窗口滤波、小波去噪等技术消除测量误差,针对缺失数据开发基于时空相关性的插值算法,确保数据集的完整性。特征工程阶段运用时频分析方法提取故障敏感特征,如通过经验模态分解获取振动信号的本征模态函数,利用傅里叶变换定位电气信号的谐波成分,结合统计指标构建特征向量空间。预测模型构建采用分层架构设计,底层使用卷积神经网络自动学习数据的空间特征,上层通过长短期记忆网络捕捉时序依赖关系,形成端到端的深度学习框架。针对小样本场景,开发迁移学习策略,利用相似机型的历史数据初始化模型参数,有效缓解过拟合问题。

2.3 混合预测方法

数据物理融合预测通过构建双通道处理架构实现优势互补。物理模型通道提供设备运行的先验知识约束,将动力学方程求解结果作为数据模型的输入特征,增强模型对异常工况的解释能力;数据模型通道利用海量运行数据修正物理参数,通过贝叶斯框架实现模型不确定性的量化表达。多源异构数据融合技术突破单一传感器局限,将SCADA系统的功率曲线、气象站的湍流强度数据与设备状态监测信号进行时空对齐,采用图神经网络构建跨模态关联图谱,挖掘隐藏在异构数据中的故障耦合关系^[3]。这种融合诊断方式在复合故障场景中表现突出,能够通过多维度信息交叉验证提升诊断置信度,为运维决策提供更全面的依据。

3 风电设备安全管理策略

3.1 人员安全管理

风电场人员安全管理体系以风险预控为核心,构建

多层级安全教育机制。新入职人员需完成厂级、车间级、班组级三级安全教育,通过理论考核与实操评估双重验证,确保掌握安全规程与应急处置技能。针对高空作业、电气操作等特种岗位,实施严格的资质审查制度,要求作业人员持应急管理部门颁发的专项操作证书,并定期复审更新知识体系。安全技术交底工作遵循"作业前确认"原则,根据当日施工内容编制个性化交底方案,重点说明设备带电状态、危险区域划分及防护用具使用要求,交底过程采用图文并茂的展示方式,确保作业人员充分理解安全要点。建立安全行为观察机制,通过现场巡查与视频监控双重手段,及时纠正违规操作,对典型问题开展专项整改培训,形成"教育-执行-反馈"的闭环管理。

3.2 设备安全管理

设备全生命周期管理强调预防性维护理念。制定分级检查制度,日常巡检聚焦关键部件运行参数,周检覆盖润滑系统、紧固件状态,月检则对齿轮箱、发电机等核心设备进行深度检测。引入振动分析、油液检测等状态监测技术,构建设备健康指数评估模型,通过趋势分析预测剩余寿命,为维修决策提供数据支撑。备件管理采用ABC分类法,对齿轮、轴承等故障频发部件保持安全库存,对长周期采购件建立战略供应商合作机制,确保紧急情况下的快速供应。建立设备维修档案电子化系统,记录每次检修的时间、内容、更换部件等信息,通过大数据分析识别设备劣化规律,优化维护策略。针对老旧设备实施技术改造,加装智能传感器提升监测精度,延长设备服役周期。

3.3 作业环境安全管理

施工现场布局遵循"功能分区、物流顺畅"原则,划分材料存放区、设备组装区、运输通道等明确区域,设置警示标识与防护栏杆,确保人员流动与物料搬运互不干扰。季节性施工管理制定差异化方案,夏季配备防暑降温设施,调整高温时段作业强度;冬季对液压系统采取保温措施,防止低温导致设备动作迟缓。针对沙尘、盐雾等特殊环境,为户外设备加装防护罩,定期清洗电气元件表面沉积物。交叉作业管理建立协调机制,通过施工进度表共享作业信息,对吊装、电气接线等高风险工序实施错时安排,设置专职安全员进行现场监护。建立应急响应体系,配置消防器材、急救设备等应急资源,定期组织火灾逃生、触电急救等专项演练,提升全员应急处置能力。

4 故障预测与安全管理的协同机制

4.1 信息共享与沟通机制构建

风电设备运行信息流通体系以数据融合为基础，通过搭建统一数据中台实现多源异构数据集成^[4]。故障预测系统产生的设备健康状态数据、剩余寿命预测值等结构化信息，与安全管理系统记录的巡检记录、隐患整改情况等非结构化数据，在数据中台完成时空对齐与语义关联。建立标准化数据接口规范，确保振动分析模块输出的频谱特征参数、温度监测系统采集的热点分布图等关键信息，能够无障碍传输至安全风险评估模块。部门间沟通采用"业务驱动+技术支撑"的双轨模式，安全管理部门通过可视化看板实时获取设备劣化趋势，故障预测团队则基于安全事件反馈优化监测阈值设置，形成需求对接与技术迭代的良性互动。

4.2 风险预警与应急响应联动

风险预警体系实施分级管控策略，根据故障概率与后果严重程度划分四个预警等级（红色、橙色、黄色、蓝色），具体分级标准如表1所示：

表1

预警等级	故障概率	后果严重程度	响应方式
红色	> 80%	严重停机、安全事故	短信推送决策层、声光报警、紧急停机
橙色	60%-80%	停机风险、维修成本高	电话通知负责人、2小时内核查
黄色	40%-60%	性能下降、轻微故障	企业微信推送、12小时内核查
蓝色	20%-40%	无立即风险、需关注	企业微信推送、24小时内核查

应急响应流程强调"日常防控与应急处置相结合"的原则，日常状态下通过仿真推演优化应急资源布局，每年开展2次全场景仿真推演；应急状态下依托数字孪生技术实现远程指挥与现场处置的虚实映射，映射精度达到95%以上。预案管理采用"基础模板+场景定制"模式，针对齿轮箱故障、叶片断裂等典型故障场景编制标准化处置流程，处置流程时长控制在2-4小时；同时为极端天气、电网故障等特殊工况预留接口，确保预案的适应性与可操作性。建立应急能力评估矩阵，从响应时效、处置效果、资源调配等维度量化评估每次应急行动，评估得分不低于85分，为预案修订提供数据支撑。

4.3 持续改进与优化闭环

故障预测模型优化遵循“数据驱动-机理约束”双循环机制。在线学习模块持续吸纳新采集的运行数据，通过迁移学习技术实现模型参数的动态调整；离线分析模块则结合设备结构特性与失效物理模型，对模型输出进行可信度校验。安全管理策略调整建立“预测-评估-决策”三级机制，月度层面根据故障趋势分析调整巡检频次，季度层面基于设备健康指数优化备件库存策略，年度层面结合长期预测结果制定技术改造计划^[5]。构建PDCA改进循环，将每次故障处置经验转化为知识库条目，通过自然语言处理技术实现经验案例的智能匹配与推送。建立跨部门改进小组，由故障预测工程师、安全专员、设备维护人员组成，定期召开复盘会议，从技术可行性、经济合理性、操作便捷性等维度评估改进措施效果，确保协同机制持续优化升级。

结束语

风电设备故障预测与安全管理是一个涉及多学科、多环节的复杂系统工程。通过融合物理模型与数据驱动技术，可实现故障早期精准识别；通过构建人员、设备、环境三位一体的安全管理策略，可有效降低运行风险；通过建立信息共享、风险预警与持续改进的协同机制，可形成故障预防与应急处置的闭环管理。实践表明，只有将技术手段与管理措施深度融合，才能全面提升风电设备的运行可靠性，为热动新能源产业的可持续发展奠定坚实基础。

参考文献

[1]曾兴旺.基于图像特征的风电场电气设备故障红外图像目标识别[J].电工技术,2025(4):160-162.

[2]胡春雷.风电场设备智能监测与故障诊断分析[J].装备制造技术,2024(5):144-146,150.

[3]袁涛.风电机组齿轮箱散热系统故障分析及解决方案[J].电脑校园,2024(18):139-141.

[4]张磊,周强,张宇,等.风电场设备智能监测技术及故障诊断分析探讨[J].中国设备工程,2026(2):155-157.

[5]董金波.风电设备故障预警与诊断技术探析[J].电力设备管理,2025(6):107-109.