

风机偏航系统卡滞故障成因分析及检修维护方案探讨

白晓明

(国华新能源(双辽)有限公司大兴风电场, 吉林 双辽 136400)

摘要 风机偏航系统直接决定机组对风精准度, 是保障风电场高发电量、降低运维成本的关键环节。卡滞故障易引发对风偏差增大、发电功率降低, 严重时诱发连锁故障。本研究以风机现场运维为基础, 结合现场运维实践, 融合力学、流体力学、信号传输及油脂氧化理论, 从机械、液压、电气、润滑四方面系统分析卡滞成因, 阐明多系统耦合失效机理; 提出量化检修维护方案, 构建基于 BP 神经网络的故障预警体系。经实测数据与典型案例验证, 该方案可显著降低卡滞发生率, 为陆上低温、多沙尘工况下风机偏航系统长效运维提供技术参考。

关键词 风机偏航系统; 卡滞故障; 检修维护; 运维优化; 故障预警

中图分类号: TM315

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.003

0 引言

随着风电产业向高海拔、低温、多沙尘等复杂地域快速扩张, 风机运行环境持续恶化, 偏航系统卡滞故障占比逐年升高, 已成为影响机组稳定运行、降低发电效益的主要问题。国外研究侧重基于机器学习与信号处理的智能诊断, 但模型泛化性差, 与陆上复杂工况适配性不足; 国内研究多聚焦单一部件故障排查, 缺少多系统耦合机理分析与全流程量化运维方案, 现场数据支撑薄弱^[1]。本研究以风机现场运维为基础, 依托长期运维数据与故障案例, 从分系统拆解到耦合关联分析, 明确卡滞故障核心诱因。制定标准化、量化的检修维护工艺, 搭建集实时监测、智能分析、分级预警于一体的防控体系, 补齐偏航系统运维技术短板, 推动风电运维向精细化、智能化方向发展。

1 风机偏航系统卡滞故障成因分析

1.1 机械传动部件异常磨损卡滞

机械传动部件是偏航动力传递与载荷承载核心, 异常磨损卡滞是卡滞故障的主要机械诱因, 本质为变载荷作用下的非均匀磨损与接触疲劳失效。偏航齿轮副受随机风载冲击, 齿面磨损遵循赫兹接触疲劳理论; 齿轮啮合间隙不当引发应力集中, 产生点蚀、剥落等缺陷, 形成卡涩卡点^[2]。

偏航轴承滚动体与滚道非均匀磨损, 主要由安装同轴度偏差、环境杂质侵入导致。实测表明: 安装同

轴度偏差 $> 0.1 \text{ mm/m}$, 或侵入沙尘粒径 $> 5 \text{ } \mu\text{m}$ 时, 卡滞概率显著上升; 摩擦阻力超出电机输出扭矩时, 产生附加摩擦力矩, 直接引发卡滞。传动轴花键磨损、键槽变形会进一步加剧卡涩。

不同工况磨损速率差异显著: 高海拔、多沙尘环境齿轮副磨损加快; 低风速地区轴承长期低速运转, 润滑分布不均, 磨损速率提升。此类故障隐蔽性强, 需依托在线振动监测与超声波检测实现早期识别。

1.2 液压制动系统压力波动泄漏

液压制动系统压力波动与内外部泄漏, 由密封失效、油液污染、管路阻力异常共同导致, 可通过流体力学方程定量分析。油液流速 $> 5 \text{ m/s}$ 时, 压力波动超出允许范围, 引发制动异常。

压力过高会造成制动钳过度夹紧, 压力过低不能有效地制动, 都会造成系统卡滞或者疲劳卡滞。液压泄漏分为内外泄露, 内泄漏的检测率低, 会造成系统压力建立时间长, 产生瞬间卡滞。

在低温条件下, 液压油的黏度增大, 阀芯的卡滞风险也随之提高, 压力的起伏范围也会变大。传统的检修忽略了液压油的污染控制以及低温适应性问题, 故障复发率高。另外, 管路布置不合理会引起压力损失增大。由于管路压力出现异常波动导致卡滞, 需对管路走向进行优化, 减少阻力点, 加入低温液压油添加剂 (L-HV46 抗低温添加剂, 添加量 $3\% \sim 5\%$), 改善油液低温流动性。

作者简介: 白晓明 (1993-), 本科, 助理工程师, 研究方向: 风机偏航系统维护。

1.3 电气控制系统逻辑紊乱失效

电气控制系统为偏航系统“大脑”，逻辑紊乱与元件失效本质是信号传输失真、指令执行偏差。偏航采用闭环控制，信号传输延迟 $>100\text{ ms}$ 时，PLC对风信号失真，指令逻辑混乱，诱发卡滞。

现场数据显示，电气类卡滞由三类因素主导：一是偏航传感器受恶劣环境影响，信号漂移、采集时延增大，卡滞发生率提升35%；二是绝缘栅双极晶体管（Insulate-Gate Bipolar Transistor, IGBT）元件老化，导通损耗增大、触发频率异常，电机转速与扭矩失衡，驱动与制动配合偏差引发卡滞；三是回路接触不良、线路老化，信号中断概率增加20%。

响应时间标准：陆上风机偏航控制响应 $\leq 200\text{ ms}$ ，海上风机 $\leq 150\text{ ms}$ ；超出该范围，卡滞发生率上升30%以上^[3]。

1.4 润滑系统油脂劣化供给中断

润滑系统油脂劣化和供给中断本质上是油脂的理化性质发生变化和管路流体阻力异常造成的润滑失效，润滑油脂劣化由高温、氧化、杂质侵入引起，劣化时酸值增大、黏度变化率大于20%，润滑效果下降，机械部件的摩擦阻力增大，造成卡滞。

从现场实测来看，沙尘环境油脂杂质与水分快速累积，劣化加速；高温环境氧化加剧，使用寿命缩短。油泵故障、管路堵塞、润滑点分配不合理导致供给中断；杂质聚集、润滑不均加重磨损。

润滑油脂选型不当，卡滞复发率高达60%，不同工况必须匹配专用油脂，因此要依照现场工况对润滑系统及润滑油脂加以改良并予以确定。

1.5 多系统耦合失效机理

偏航卡滞并非单一系统故障，多为耦合失效：润滑劣化 $\rightarrow$ 摩擦阻力上升 $\rightarrow$ 机械磨损加剧 $\rightarrow$ 电机扭矩超限 $\rightarrow$ 电气信号失真 $\rightarrow$ 液压制动响应滞后 $\rightarrow$ 最终形成卡滞。本研究按分系统拆解分析，同时兼顾耦合关联^[4]。

2 风机偏航系统卡滞故障检修维护方案

2.1 机械部件磨损检测间隙调整

按照机械传动部件异常磨损卡涩状况，提出精准检测、科学修复、动态调整、闭环验证的四维检修方式，确定操作工艺和参数来提高可操作性。超声波检测选用 $2.5\text{ MHz} \sim 5\text{ MHz}$ 探头，误差不大于 0.01 mm ，可以准确找到齿轮副、齿圈磨损（磨损量不大于 0.1 mm ）和接触疲劳缺陷，振动分析用在线监测仪，振动频率大于 80 Hz 或者振幅大于 0.1 mm 为卡滞的预示。

部件修复部分，对磨损严重（磨损量 $>0.1\text{ mm}$ ）的齿轮副、齿圈采用等离子喷涂强化工艺，材料为WC-Co合金，厚度为 $0.1\text{ mm} \sim 0.2\text{ mm}$ ，喷涂后硬度达到HRC60 $\sim$ 65，耐磨性提高3倍 $\sim$ 4倍，经实测，单台机组年运维成本降低42%^[5]。

间隙调整用动态法，根据现场运行载荷（ $1\,000\text{ N}\cdot\text{m} \sim 2\,000\text{ N}\cdot\text{m}$ ）及振动数据，调节齿轮啮合间隙为 $0.2\text{ mm} \sim 0.5\text{ mm}$ ，偏航轴承游隙为 $0.15\text{ mm} \sim 0.3\text{ mm}$ ，防止静态调整间隙偏差。检修结束做空载试车（转速 $5\text{ r/min} \sim 10\text{ r/min}$ ， 30 min ）、负载试验（负载为额定70% $\sim$ 100%， 60 min ），用振动监测数据检验效果，保证振动频率 $10\text{ Hz} \sim 50\text{ Hz}$ 、振幅不超 0.1 mm ，形成闭环维护。

检修前断开偏航系统电源，锁定制动装置，人员戴安全帽、防滑鞋等；检修周期半年一次，高海拔、多沙尘环境缩短至三个月一次；耗材更换标准为齿轮副磨损超过 0.1 mm 、轴承滚动体磨损超过 0.05 mm 时立即更换。

2.2 液压系统压力测试密封更换

对液压制动系统压力波动、泄漏进行系统的检查和维修。压力测试用精度不大于 0.01 MPa 的压力传感器和数据采集系统，对启停、制动等工况下的压力变化进行监测，在正常工作压力范围内压力波动不能大于 0.3 MPa ，如果出现压力波动大于 0.5 MPa 的情况，则排查溢流阀、减压阀以及阀芯堵塞等问题，进而调节好溢流阀压力到 $12\text{ MPa} \sim 13\text{ MPa}$ 和减压阀压力到 $9\text{ MPa} \sim 10\text{ MPa}$ 。

采用荧光检漏法，荧光剂加入量控制在 $0.1\% \sim 0.2\%$ ，用紫外线照射可以迅速找到内、外泄漏点，检测准确率95%以上，内泄漏量不大于 5 mL/min ，外泄漏量不大于 3 mL/min 。密封更换使用耐高低温（ $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）耐磨损氟橡胶密封件，密封件硬度邵氏70 $^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ，密封件更换后做密封试验，不得有泄露，液压油采用三级过滤净化处理（过滤精度分别为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 、 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3\text{ }\mu\text{m}$ ），清除油液中污染物，使油液的清洁度达到NAS8级。

低温环境适配优化，L-HV46型低温液压油添加剂加入量为3% $\sim$ 5%，减小油液的黏度，使油液在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时黏度不大于 $50\text{ mm}^2/\text{s}$ ；加装液压系统保温装置，保温层厚度 $50\text{ mm} \sim 80\text{ mm}$ ，保证系统工作温度在 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。检修完毕后进行保压试验（保压压力为 12 MPa ，保压时间为 30 min ，压力降不大于 0.2 MPa ），制动和偏航动作同步（同步偏差不大于 0.2 s ）。

长效维护，每三个月校准一次溢流阀、减压阀，每

年六月检测液压油的理化指标(酸值不大于 0.1 mgKOH/g、水分含量不大于 0.1%、杂质含量不大于 0.05%),检测不合格立即更换液压油;每年十二月更换一个密封件,防止密封件老化造成泄漏。

2.3 电气回路排查程序逻辑优化

对电气控制系统逻辑混乱、失效情况采用回路排查、元件检测、逻辑优化、预警升级的检修方法,提高控制可靠程度。回路电阻测试标准回路电阻不大于 0.5 Ω ,接触不良处的电阻大于 1 Ω 时打磨处理,更换耐高温、耐老化硅橡胶接线端子和线路(适用于温度范围为 -40 $^{\circ}\text{C}$ ~ 150 $^{\circ}\text{C}$),改善线路布置情况,减少环境因素对信号传输造成的影响。

元件检测 PLC 模块使用编程器检测指令执行时间 ≤ 100 ms, IGBT 元件测量导通电压 ≤ 1.5 V, 触发信号幅值 ≥ 5 V, 老化元件立即更换, 偏航传感器用校准仪校准, 风向标误差 $< 0.1^{\circ}$, 编码器信号传输滞后 < 50 ms, 保证信号采集无误。

在控制逻辑上根据现场运行数据, 用加权平均滤波算法对风信号进行处理, 消除由于信号漂移造成的干扰, 使信号处理的延时由原来的 150 ms 缩短到 80 ms; 增加故障自诊断模块, 实时监测电气系统运行情况, 发现有信号失真、电机扭矩不正常等卡滞的前兆时, 立即发出警告(警报响应时间 ≤ 1 s), 对不同的机型设置了不同的控制参数, 陆上风机偏航控制响应时间 ≤ 200 ms, 海上风机 ≤ 150 ms。

安全和长期保养, 每隔三个月做一次 PLC 程序备份, 每六个月对控制逻辑进行一次改善; 增加电气回路过载保护装置, 过载电流设为额定电流的 1.2 倍, 防止线路过热、元件烧毁, 检修周期为每 4 个月 1 次, 海上风机缩短到每 2 个月 1 次, 作业前断开电源, 做好绝缘防护。

2.4 润滑油脂定期更换管路疏通

根据工况选择专用润滑脂, 高海拔低温、海上高湿、多沙尘环境分别使用相应的型号润滑脂。建立量化更换标准, 油脂检测指标达到酸值 ≥ 0.3 mgKOH/g、黏度变动率 $> 20\%$ 、水分含量 $> 0.1\%$ 、杂质含量 $> 0.05\%$ 时及时更换润滑油, 润滑油更换周期根据工况不同而定, 换油后油箱清洁度为 NAS7 级。

用高压气体吹扫和专用清洗液循环疏通管路, 改善管路布置, 保证油脂流速和油膜厚度满足要求。建立润滑系统台账, 2 个月检查油泵, 关键管路加装过滤器, 沙尘环境加装防尘罩, 每季度检测油脂理化指标并动态调整方案。

2.5 卡滞故障预警体系构建

建立以 BP 神经网络为基础的偏航卡滞故障预警系统, 数据采集模块每分钟采集机械、液压、电气、润滑等各个方面的参数, 使用现场机组长时间运行的数据作为训练样本, 预警准确率大于 90%。预警系统设三个阈值, 现场警报和远程推送都是分级预警。预警体系同风机运维平台、检修流程相联接, 达成故障前兆识别、自动预警、迅速处置的闭环管理, 能使得卡滞故障发生率下降 30% 以上, 给偏航系统安全稳定运行赋予智能保障。一级预警是对于参数轻微偏离阈值的处理方式, 只通过运维平台发出提醒; 二级预警是对参数异常趋势明显的处理方式, 现场会发出声光警报, 并且需要运维人员在 2 小时内到场进行排查; 三级预警则是对卡滞故障前兆的处理方式, 立即触发机组降负荷运行, 同时发出紧急检修指令, 保证故障能被及时发现并处理。定期对预警模型进行迭代更新, 把新的故障案例数据加入进去, 不断改善预警的准确度, 适应不同工况下机组的运行需求, 削减故障处理的成本和停机造成的损失。

3 结束语

本研究构建分系统+耦合失效分析模型, 明确机械磨损、液压泄漏、电气紊乱、润滑劣化四大核心成因, 揭示故障连锁传导机理; 提出四维机械检修、量化液压维护、电气逻辑优化、精细化润滑管理方案, 形成全流程可落地运维标准; 搭建 BP 神经网络智能预警体系, 实现故障超前预警、精准处置。未来研究可围绕不同机型、不同地域工况定制差异化防控方案, 融合多算法提升预警模型精度与泛化性; 探索远程运维与无人巡检技术, 降低现场运维成本与安全风险; 通过长期现场验证持续完善运维机制, 为风电产业高质量发展提供全方位技术支持。

参考文献:

- [1] 王剑利. 基于多维度测风装置的风力发电机组偏航系统优化研究[J]. 科技与创新, 2026(05):213-215.
- [2] 牛玉静, 胡锋涛, 徐亮. 某风电场风机偏航轴承断齿原因分析[J]. 河南电力, 2025(S2):48-50,70.
- [3] 孙星, 王晓宇, 吕诚. 大功率风电机组偏航系统故障分析及技术改进[J]. 山西电力, 2025(05):30-35.
- [4] 李顺民, 张军. 风电场 FD82C-1500 风机偏航系统变频器改造及性能提升研究[J]. 中国设备工程, 2025(19):100-102.
- [5] 谢君. 风电产业链中风机偏航系统控制策略研究综述[J]. 产业创新研究, 2024(12):108-110.