# 风电机组偏航系统故障分析与日常运维管理研究

余建华

国能云南新能源开发有限公司　云南昆明

【摘要】偏航系统通过调整机舱方位实现对风，其可靠性影响风电机组发电效率与运行安全。本文以云南某高海拔风电场 25 台 2.0MW 双馈式风电机组（总装机容量 50MW）为研究对象，结合现场运维记录、故障拆解分析和运行数据，从机械传动、液压制动、电气控制和润滑供给四个方面细化故障模式，建立“部件—模式—征兆—诱因”编码体系，提出基于运行暴露时间的故障强度估计及短期发生概率模型。通过维护部件定位、故障逻辑归纳和分级处置流程，将故障识别与巡检、消缺、复运验收及台账更新相衔接。研究形成适用于该类机组的运维实施建议；所建概率模型为后续数据分析和仿真提供方法框架，参数仍需由完整事件台账标定。

【关键词】风电机组；偏航系统；故障分析；运维管理；状态检修

【收稿日期】2026 年 5 月 15 日　【出刊日期】2026 年 6 月 20 日　【DOI】10.12208/j.jeea.20260018

## Research on fault analysis and routine operation and maintenance management of wind turbine yaw systems

*Jianhua Yu*

*China Energy Yunnan New Energy Development Co., Ltd., Kunming, Yunnan*

【**Abstract**】The yaw system aligns the nacelle with the wind direction; its reliability directly impacts the power generation efficiency and operational safety of a wind turbine. This study focuses on 25 units of 2.0 MW doubly-fed wind turbines (with a total installed capacity of 50 MW) at a high-altitude wind farm in Yunnan. By integrating on-site operation and maintenance (O&M) records, fault disassembly analysis, and operational data, this paper categorizes fault modes across four dimensions: mechanical transmission, hydraulic braking, electrical control, and lubrication supply. A “component–mode–symptom–cause” coding system is established, and a model for estimating fault intensity and short-term occurrence probability—based on operational exposure time—is proposed. Through the identification of critical maintenance components, the induction of fault logic, and the implementation of a tiered handling process, the study integrates fault identification with routine inspections, defect rectification, post-repair acceptance, and the updating of maintenance logs. The research provides practical O&M recommendations tailored to this type of wind turbine. The developed probability model offers a methodological framework for future data analysis and simulation, with parameters subject to further calibration using comprehensive event logs.

【**Keywords**】Wind turbine; Yaw system; Fault analysis; Operation and maintenance management; Condition-based maintenance

## 引言

偏航系统相关研究涉及齿轮强度校核、对风偏差补偿与控制策略优化[1-2,5]，但现场管理仍需将部件状态、故障事件和处置措施相衔接。本文以风电场运维实践为依托，采用故障逻辑分析、现场拆解检测和运行数据分析方法，梳理典型故障及诱因，建立细化故障编码和概率建模框架，并提出覆盖识别、处置、验收及反馈的管理流程。研究范围限定于电机驱动、液压制动型偏航系统，相关压力、润滑与磨损参数须结合机型手册使用。

## 1 风电机组偏航系统故障分析

### 1.1 机械结构类故障

偏航齿圈和驱动齿轮的磨损是高发机械故障。根据现场运维数据可知，高海拔、沙尘环境下，现场记录约 6 台运行 5 年以上的机组出现齿面磨损或点蚀。由于尚

作者简介：余建华（1993-）男，彝族，本科，云南丽江人，助理工程师，主要从事：风电场运维工作。

未列明同龄机组分母和统一观察期，该记录仅用于描述受影响机组数量，不作为年故障概率。主要由于沙尘颗粒通过密封间隙进入啮合面磨粒磨损、齿面材料剥落，由于偏航驱动小齿轮与大齿圈啮合间隙调节不恰当而产生偏载或者齿顶干涉，长时间工作造成疲劳点蚀，润滑脂补充不足或者油品变质，齿面边界油膜破坏，出现干摩擦损伤。早期出现周期性的金属摩擦声，后期会发展成齿面剥落、断齿，最后造成偏航卡滞[1]。

1.2 液压系统类故障

偏航系统刹车制动、驱动阻尼多依靠液压系统提供动力，液压失效会造成偏航功能异常，系统压力异常是其中常见故障。根据现场测试结果可以得知，本研究机型主系统压力参考范围为 140～150bar，偏航半泄压力参考值约为 25bar；故障机组存在偏离上述工况设定值的现象，其他机型须以厂家液压原理图和调试规程为准。压力偏低多由于液压油泄漏、蓄能器氮气泄漏、溢流阀卡滞引起，会造成刹车制动力不足，出现偏航过程中机舱晃动；压力偏高多由于溢流阀调节失效、回油管路堵塞造成，会加剧密封件磨损，甚至造成管路爆裂。另外，液压系统泄漏是现场常见的问题，分为外泄漏和内泄漏。外泄漏主要发生在管路接头、密封件老化处，现场约 6 台运行 5 年以上的机组曾出现不同程度的接头渗油；该数量不是统一观察期内的年发生概率，高海拔昼夜温差大造成密封件反复热胀冷缩是主要原因；内泄漏多发生在液压泵内部磨损、电磁阀阀芯密封失效时，表现为系统保压时间短、压力下降快，严重时无法建立正常制动压力[4]。偏航刹车钳故障会造成制动性能的下降。现场检查发现部分机组刹车钳回油管路堵塞，造成刹车片不能正常脱开，偏航时摩擦，刹车盘过热、刹车片快速磨损；还有部分机组刹车钳活塞卡滞，造成单侧刹车片偏磨，制动力矩分布不均，长期运行会造成刹车盘偏磨变形。

1.3 电气与控制类故障

偏航驱动电机故障主要是电机堵转、绕组烧毁、轴承异响。原现场汇总中电机故障占偏航电气故障记录的约 40%，该值属于类内事件构成比，统计期与事件总数需由台账核验，不能直接作为机组故障概率。堵转多由于机械卡滞、过载引起，齿圈异物卡阻、刹车未完全释放；绕组烧毁多由于长期过载运行、散热不良引起，高海拔环境下空气稀薄，电机散热效率降低，烧毁风险增大。偏航驱动减速器漏油、齿轮磨损属于机械传动问题，可能造成偏航驱动力不足，出现偏航速度慢、位置偏差大。同时，编码器故障会导致偏航位置反馈出错，造成偏航过冲或不足；扭缆开关误动作会使自动解缆程序误执行，引起偏航误动作；风速风向仪数据误差会降低对风精度、减少发电量。该风电场出现过 3 起由于风向仪数据漂移造成偏航对风误差超过 15° 的事件，同期记录中相关单台机组月发电量减少约 2.3%；该观察尚未剔除风资源与限电等因素影响，不作为漂移故障的独立因果效应。




图 1 偏航系统故障模式、证据与诱因关联图

1.4 润滑与环境类故障

润滑系统失效、环境侵蚀是偏航系统故障逐渐发展的主要推手，也是大多数机械故障的底层原因。偏航齿圈、轴承、驱动齿轮均依靠润滑脂形成保护油膜。现场油液检测发现，故障机组润滑脂中金属颗粒含量比正常值高 3 倍以上，部分润滑脂出现乳化、变硬现象。自动润滑系统故障是主要原因，润滑泵缺油、管路堵塞、分配器流量不均都会造成润滑点供油不足，部分机组润滑周期设置不合理，在高沙尘环境下仍然按照平原地区周期设置，润滑脂补充速度跟不上损耗速度。环境侵蚀使得部件的衰减速度变快。风电场设于高海拔山区，紫外线强烈，昼夜温差较大，橡胶密封件容易老化龟裂，密封效果变坏，沙尘天气多发，空气中石英颗粒硬度大，进入运动副间隙后立即引发磨粒磨损，高海拔地区雷电活动频繁，感应雷过电压会损坏偏航控制模块和传感器，引发电气故障。

1.5 故障细分类与事件编码

图 1 将功能失效、基本故障模式和诊断证据分层表示，环境因素作为跨系统诱因，不与部件故障并列累加。表 2 按可观察失效模式细化分类，编码由类别字母与序号组成。M3 记录轴承或连接异常，H2 记录泵阀失压等功能模式；只有证据足以区分时再增加部件子码。一个工单内因同一根因连续出现的重复告警合并为一个事件，修复并验收后再次失效才另计。多故障链采用一个主故障码和多个诱因 / 伴随标签；证据不足时记为待定码 U，复核后更新，避免将下游电机过流与上游机械卡滞重复计数。

**表 1　偏航系统现场记录及其统计口径**

| 故障类别 | 现场记录及统计口径 | 主要诱因 |
|---|---|---|
| 机械结构类 | 约 6 台出现齿面磨损或点蚀；同龄机组分母和观察期未明确 | 沙尘磨损、啮合间隙不当、润滑不足 |
| 液压系统类 | 约 6 台存在接头渗油；与机械故障机组可能重叠 | 密封老化、阀卡滞、泵磨损 |
| 电气与控制类 | 电机故障约占电气故障记录 40%；属于类内构成比 | 机械卡滞、散热不足、元件老化 |
| 润滑与环境类 | 故障样本中金属颗粒含量超过参考正常值 3 倍；属于状态指标 | 供脂不足、污染、密封劣化 |

**表 2　偏航系统细化故障编码与判别证据**

| 编码 | 部件与失效模式 | 主要征兆 / 判别证据 | 优先核查 |
|---|---|---|---|
| M1 | 齿圈 / 小齿轮磨损点蚀 | 齿面剥落、周期异响 | 润滑、啮合间隙 |
| M2 | 断齿 / 啮合卡滞 | 不能转动、局部破损 | 异物、齿顶干涉 |
| M3 | 轴承异常 / 连接松动 | 游隙、振动或标记位移 | 轴承、螺栓连接 |
| M4 | 减速器漏油 / 传动损伤 | 油位下降、驱动无力 | 密封与传动状态 |
| H1 | 接头 / 密封外泄漏 | 可见渗油、油位下降 | 泄漏点、密封件 |
| H2 | 泵阀内泄漏 / 失压 | 保压差、建压时间长 | 泵、阀及蓄能器 |
| H3 | 回油堵塞 / 制动拖磨 | 释放后仍拖滞、盘温升 | 回油压力、阀位 |
| H4 | 制动钳活塞卡滞 / 偏磨 | 双侧片厚差、释放不同步 | 活塞、钳体 |
| E1 | 电机堵转 / 绕组故障 | 过流、温升或绝缘异常 | 机械负载、供电 |
| E2 | 编码器 / 位置反馈异常 | 角度跳变、反馈不一致 | 接线、标定 |
| E3 | 风向信号漂移 | 对风误差持续偏移 | 独立风向参照 |
| E4 | 扭缆开关 / 解缆逻辑异常 | 解缆误动、限位状态异常 | 开关、计数、联锁 |
| L1 | 润滑泵缺脂 / 不出脂 | 液位低、泵动作无出脂 | 储脂、泵体 |
| L2 | 管路堵塞 / 分配不均 | 支路无脂或出脂量差异 | 管路、分配器 |
| L3 | 润滑脂污染 / 性能劣化 | 含水、硬化、颗粒异常 | 油脂、密封与环境 |

1.6 故障强度与发生概率模型

以单台机组偏航系统为统计单元，按机型、机龄和运行工况分组；第 i 类主故障码在统一统计窗内的确认事件数记为$n_i$，第 j 台机组处于可运行且具备风险暴露

条件的累计时间为$t_j$，单位为 h，$E=\sum_j t_j$为机组总暴露时间，单位为台·h。未失效机组同样贡献有效暴露时间；停机检修期不计入运行暴露。对频繁偏航造成的磨损，可另按累计偏航小时或动作次数建模，但必须同步更换分母和预测时间尺度。模式事件占比与事件强度分别为：

$$q_i=\frac{n_i}{\sum_k n_k};\ \hat{\lambda}_i=\frac{n_i}{E} \tag{1}$$

其中$q_i$仅表示已确认事件的模式构成，$\hat{\lambda}_i$的单位为次 /（台·h）。待定事件 U 须单列数量和占比，并说明是否进入系统事件总数。若仅统计“有无故障的机组数”而不掌握事件时间和复发次数，所得为特定观察窗的受影响机组比例，不能替代式（1），表 1 中的金属颗粒倍数也不能作为概率输入。

在同一工况分组内，若维修后事件过程可用平稳泊松过程近似、强度在短期预测窗内不变，则单机未来$\Delta t$个有效运行小时内至少出现一次第 i 类事件的概率，以及任一系统事件的概率为[9]：

$$P_i(\Delta t)=1-e^{-\lambda_i\Delta t};\ P_{\mathrm{sys}}(\Delta t)=1-e^{-\Lambda\Delta t}$$

$$\Lambda=\sum_i\lambda_i \tag{2}$$

式（2）的系统合成要求各主模式事件流独立且不重复计数，或已按互斥主事件分类建立系统泊松过程；存在雷击、润滑失效等共因关联时，应按共同工况分层或显式增加共因事件，不可直接叠加重复的关联模式。$P_i$并不等于“系统下一次故障属于 i 类”的概率。独立恒定强度竞争模型中，下一次事件在$\Delta t$内发生且类型为 i 的概率为：

$$C_i(\Delta t)=\frac{\lambda_i}{\Lambda}[1-e^{-\Lambda\Delta t}],\ \Lambda>0 \tag{3}$$

当$\Lambda=0$时，模型内该窗事件概率取 0，但零观测不代表零风险。若 E 内某模式零事件，在泊松假设下其单侧 95%强度上限为$\frac{-\ln(0.05)}{E}$，可用于保守排序。样本量足够时，对非零计数也应报告泊松置信区间。齿面疲劳、密封老化等若表现出随龄期变化的风险，应按龄期分段估计$\lambda_i$；只有掌握部件寿命及未失效删失记录后，才进一步拟合威布尔等寿命模型，不能将重复维修事件直接当作全新部件寿命样本。

仿真实施时，先由完整台账估计各$\lambda_i$，以$U_1$、$U_2$为相互独立的（0，1）均匀随机数，抽取下一事件运行间隔$\tau=\frac{-\ln(U_1)}{\Lambda}$，再按$\frac{\lambda_i}{\Lambda}$的累计权重用$U_2$选择模式，维修时长另从对应工单分布抽样。维修期暂停运行暴露计时，修复后的状态假设须明确；分段强度跨越工况边界时应重新计算剩余风险。重复仿真可输出模式频次、非计划停机小时及可用率，并用后续独立时间窗校验预测与实际频数。现有汇总记录尚未包含逐事件时间戳、统一观察期及分机组暴露数据，本文不据表 1 反推实测$\lambda_i$或报告仿真改善幅度。

## 2 偏航系统日常运维管理

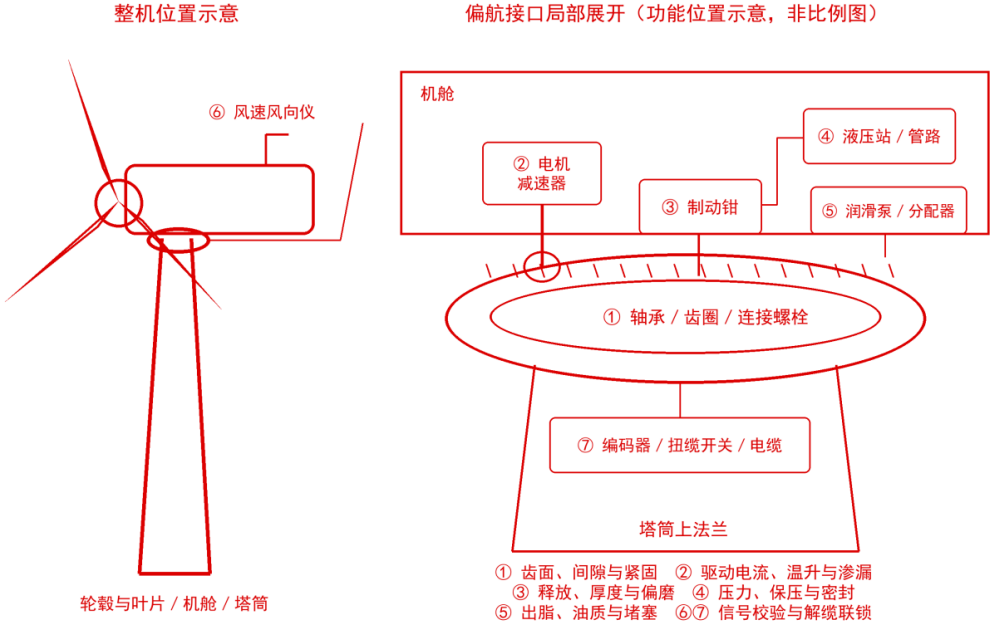


图 2　电机驱动液压制动型机组偏航维护部件定位示意图

图 2 标出七组维护对象：①偏航轴承、齿圈及连接螺栓；②驱动电机和减速器；③制动钳、摩擦片及制动盘；④液压站、蓄能器和管路；⑤润滑泵、分配器和供脂管路；⑥风速风向仪；⑦编码器、扭缆开关及电缆。部件实际布置和数量随机型变化，示意图用于定位维护对象，不替代装配图。依据图 3，监测结果应进入分级处置与验收反馈，而非仅按固定顺序实施保养。

2.1 分级日常巡检与状态监测

建立“每日远程复核、周期现场巡检、异常专项检测”的分级机制。每日由值班人员复核 SCADA 告警、偏航动作次数、电机电流、对风误差及液压压力趋势；原每两个月一次的现场巡检作为本场站周期巡检安排，遇沙尘、雷击、异常升温或重复报警时提前检查。现场按图 2 检查齿面润滑与磨损、制动盘表面、液压接头渗漏、螺栓防松标记及电缆状态，并在规程允许的测试工况下监听偏航异响和振动。远程趋势与现场证据交叉核验后填写表 2 主故障码，不凭单一报警直接更换部件[3]。

定检以厂家手册、累计运行时间和状态异常三者中先到者触发。原 500 小时、半年、年度分层安排可作为本场站计划框架，其中 500 小时项目须明确属于投运 / 大修后的首次维护还是厂家规定的循环项目，避免误作统一周期。首次或规定周期检查连接螺栓力矩、驱动功能和限位 / 扭缆联锁；半年项目包括供脂支路、回油通畅性与摩擦片厚度检查；年度项目包括齿轮啮合间隙、轴承连接、液压参数和电气绝缘检测。力矩、间隙、厚度和绝缘判据均引用对应机型手册的条款及版本，保留实测值、工具校验状态和复核人员信息。

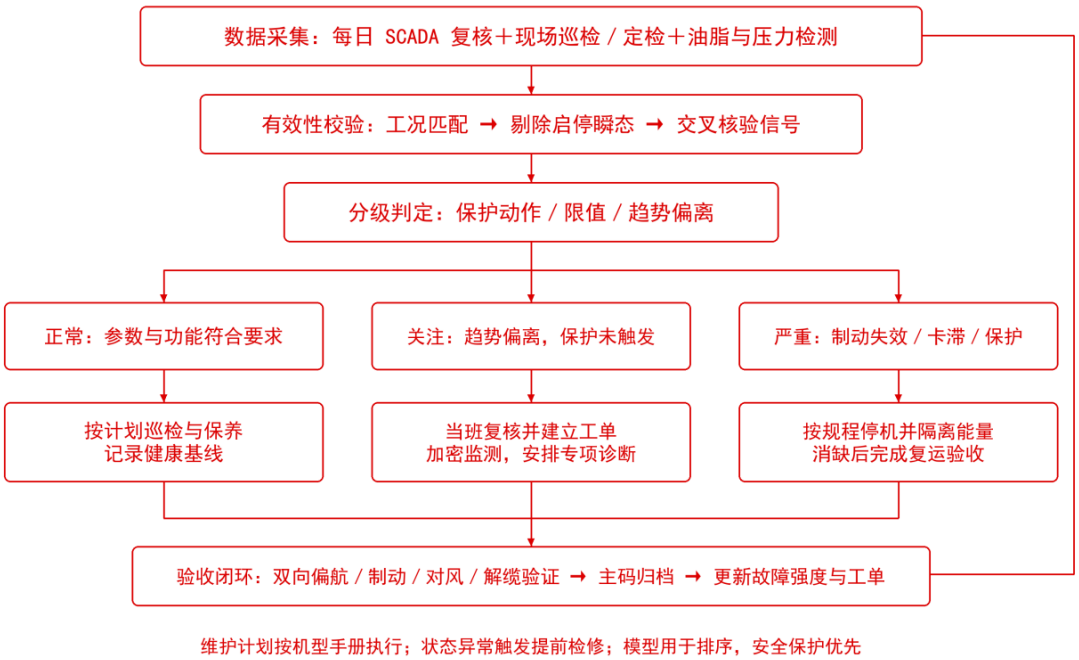


图 3 偏航系统监测、分级处置与验收反馈流程图

2.2 润滑系统专项运维管理

润滑专项维护须同时确认油脂适配、实际出脂和齿面覆盖。定检时检查泵内余脂、支路接头和分配器，按厂家方法核验各润滑点实际出脂量，不能仅凭泵运行信号判定供脂有效；对未覆盖部位按工艺手动补脂，清除污染物并检查密封。原方案将供脂间隔由 8h 缩短至 6h、单次供脂量增加 15%，按相同运行时间折算总供脂量约增加 53.3%，不宜作为所有机组的统一设置。建议经厂家确认后，选取同机型机组试行，记录补脂量、排脂状态、油脂颗粒和偏航电流；若出现积脂、密封挤脂或污染加剧，应调整方案。偏航回转与排脂检查均采用厂家规定的维护模式、角度和动作次数，不以“运行 5 分钟以上”代替工艺验收。

2.3 液压与刹车系统运维管控

液压与制动维护应区分建压、保持、偏航半泄和完全释放工况。本研究机型主系统 140～150bar、半泄约 25bar 仅作为机型参数示例，须在指定工况及测点核验；压力表、传感器和采集记录相互校对后再判断异常。保压试验记录起止压力、温度、持续时间和压降，按厂家判据识别内泄漏、阀件异常或蓄能器性能下降。液压油

位纳入巡检，油样检测、滤芯和油液更换按污染度、压差及手册周期执行。检查摩擦片双侧厚度、释放间隙、盘面损伤和温升，原 2mm 厚度值须经该机型手册确认后使用，不能作为通用报废界限。制动盘缺陷由厂家工艺判定可修复性，禁止随意打磨或在摩擦面涂防腐材料。回油管路与蓄能器作业前，按检修规程隔离能量并确认卸压，完成后做建压、保压和释放验证；充氮、拆管及制动力测试由具备资质的人员按专用工艺实施[6]。

### 2.4 故障预警与全生命周期管理

状态预警采用工况匹配与分级响应相结合的方式[7]。先按风速、温度和偏航动作状态建立健康基线，剔除启动电流和瞬态压力，校验传感器后再判断趋势。原“电流超过额定值 15%、对风误差超过 10°、压力波动超过±10bar”仅可作为待标定的筛查候选值，不直接作为通用保护定值；须明确测点、持续时间和适用工况，经历史数据回放核验误报与漏报，再由设备管理人员批准。关注级异常由值班人员当班复核、派发工单并加密监测；涉及制动功能丧失、机械卡滞、扭缆限位失效或保护动作的严重异常，按机型规程停机处置。复运前完成双向偏航、制动保持与释放、位置反馈、对风和解缆联锁测试，不得旁路保护强行复位。工单应记录发现时刻、主故障码、诱因标签、运行暴露、停机时长、实测值、维修措施和复运验收结果，由班组与设备管理人员复核关闭；每月按式（1）更新故障强度与待定事件比例，并将典型案例纳入培训[8]。

量化考核采用统一年度窗口：事件发生强度按式（1）以运行暴露时间计算；按台年报告时，另记$\lambda_{\mathrm{cal}}=\frac{N_f}{N\cdot T_y}$，单位为次 /（台 • 年），其中$T_y$为统计期年数。年均单机非计划停机小时$T_u=\frac{T_d}{N\cdot T_y}$，单位为 h /（台 • 年）。偏航原因的日历时间可用率$A_{\mathrm{yaw}}=[1-\frac{T_d}{H_{\mathrm{cal}}}]\times 100\%$，$H_{\mathrm{cal}}$为同一窗口全场机组日历小时之和，$T_d$为去重后的偏航原因非计划停机机组小时；该值不等同于含所有系统停机的机组综合可用率。完整记录内按主码汇总的事件数应与$N_f$一致，停机时段重叠须去重。

## 3 结语

针对本场站偏航系统，建议先落实以下措施。第一，由设备管理人员统一表 2 故障码及暴露时间口径，在首轮台账整理时补齐 25 台机组的投运时间、故障起止、维修和复运验收记录；对既有百分比逐项核实分母、统计期和重复事件，未核实项目不进入概率标定。第二，由班组将图 2 七组维护对象纳入点检卡，明确每日远程复核、周期现场检查及异常提前检修的责任人；制动、机械卡滞和扭缆保护异常优先按规程停机处理，趋势异常当班复核并派工。第三，对润滑周期、压力、摩擦片厚度和预警候选值形成机型参数清单，记录手册依据及批准人，试行方案以供脂、温升、电流和泄漏等复测结果验收。第四，按图 3 完成“发现—诊断—消缺—功能验收—归档”闭环，每月同时审查故障强度、待定事件比例、重复故障和非计划停机小时，用完整台账校准模型后再开展维护方案仿真。由于现有记录缺乏统一暴露量和独立验证窗口，本文不作概率精度与运维收益的定量结论；后续应以连续记录检验模型适用性和措施效果。

## 参考文献

[1] 杨远鹏,王文鑫,丛聪,杨朕,杜闯.风电机组偏航系统现场标定与补偿技术研究[J].自动化应用,2026,67(13):202-204+208.

[2] 张晋.风电机组智能偏航系统的自适应控制研究[J].张江科技评论,2025,(11):112-114.

[3] 孙士雪,宋立柱,闫家彬,孟庆栋.砀山风电场 15#风电机组偏航液压系统压力异常故障处理全流程解析[J].风能,2025,(10):114-117.

[4] 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,(5):30-35.

[5] 申向荣.风电机组偏航系统的模型预测控制策略与动态参数优化研究[D]. 北京:华北电力大学,2025.

[6] 胡姚刚,刘怀盛,时萍萍,陈新岗,方超,李辉,冉军.风电机组偏航系统故障诊断与寿命预测综述[J].中国电机工程学报,2022,42(13):4871-4884.

[7] 邓子豪,李录平,刘瑞,杨波,陈茜,李重桂.大型风电机组电机驱动型主动偏航系统故障诊断技术概述[J].太阳能,2020,(4):34-41.

[8] 徐金晖,郭鹏,宋鹏,柳玉.风电机组偏航系统静态偏差分析与研究[J].华电技术,2019,41(7):1-5+9.

[9] NIST/SEMATECH. e-Handbook of Statistical Methods: 8.1.6.1 Exponential[EB/OL]. [2026-10-21]. https://itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr161.htm.

**版权声明：**©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
OPEN ACCESS