

风电机组齿轮箱常见故障诊断与维护策略

侯孟林

大唐（丘北）新能源有限公司 云南 文山 663200

【摘要】：风电机组齿轮箱处于低速大转矩、变载冲击和塔筒振动共同作用环境，齿面磨损、轴承损伤和润滑失效会快速放大传动链偏差。本文分析齿轮箱结构运行与故障诱因，梳理现场巡检、振动频谱和油液磨粒诊断方法，提出润滑油管理、分级保养和工况载荷调整策略。诊断与维护联动后，异常信号能够更早转化为检修动作，齿轮箱运行风险可在停机前得到分级处置，并减少突发停机损失。

【关键词】：风电机组；齿轮箱；故障诊断；状态监测；维护策略

DOI:10.12417/2811-0528.26.20.026

引言

风电机组齿轮箱把叶轮低速大转矩输入转换为发电机所应高速转矩，内部行星级、平行级齿轮和多列轴承长期承受风速波动、偏航误差、并网冲击与润滑状态变化。齿轮箱故障往往不是单一部件突然失效，而是齿面接触疲劳、轴承微点蚀、油液污染和安装偏差在多个运行周期内叠加，早期只表现为温升、振动边带或磨粒浓度变化。诊断工作若停留在故障后拆检，维护策略只能被动响应停机；把结构运行机理、状态监测信号和维护分级规则放在同一链条内，才能提高齿轮箱故障识别的针对性。

1 风电机组齿轮箱结构运行概述

（1）齿轮传动链组成与工作原理：风电机组齿轮箱通常由低速输入轴、行星级齿轮、平行级齿轮、高速轴、滚动轴承、箱体和强制润滑系统组成。叶轮载荷先进入低速轴和行星架，经过一级或多级增速后传递至高速轴，再由联轴器驱动发电机；齿轮啮合线上的接触应力、轴承滚道上的交变载荷和箱体支承刚度共同决定传动稳定性^[1]。箱体刚度不足或轴承游隙变化会改变啮合载荷分配，使同一风速下的振动响应出现差异，结构理解由此成为后续诊断的前提。齿轮箱内部结构和测点布置见图1。

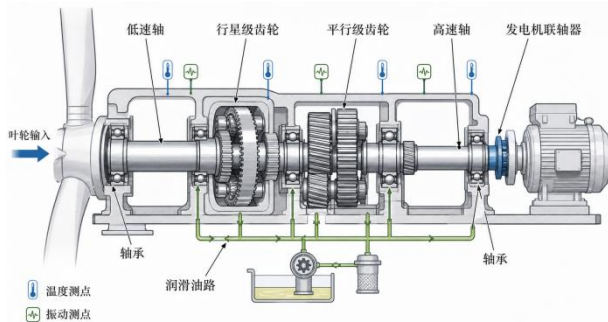


图1 风电机组齿轮箱传动链与监测测点示意

图1中，低速轴、行星级齿轮、平行级齿轮和高速轴形成

连续传动路径，轴承分布在各级支承位置，绿色油路覆盖主要啮合区和轴承区；温度测点与振动测点靠近箱体关键部位，说明诊断信号应同时反映载荷传递、润滑供给和支承状态。

（2）齿轮箱常见机械故障核心诱因：齿轮箱常见机械故障集中在齿面、轴承、轴系对中和润滑系统几个位置。齿面点蚀与剥落多由交变接触应力、局部油膜不足和硬质颗粒压痕触发，轴承内外圈裂纹与滚动体剥落则常伴随偏载、微滑移和润滑退化；高速轴端对中偏差会把径向振动传入联轴器，使啮合频率附近出现边带。油温升高、油液黏度下降和滤芯压差增大又会削弱油膜承载能力，形成磨损颗粒继续损伤齿面和轴承的循环。在寒冷、高海拔或沙尘较多的风场，油液水分、粉尘颗粒和启停冲击还会改变故障发展速度，早期诱因更容易表现为多部位轻微异常，而不是单一零件的明确损坏。

2 风电机组齿轮箱常见故障诊断方法

（1）现场巡检温升异常初步诊断法：现场巡检用于发现齿轮箱外部可见、可听和可触的早期异常，重点放在箱体渗漏、呼吸器堵塞、油位波动、联轴器护罩异响和底座螺栓松动。温升异常不能只看单点读数，机舱环境温度、机组负荷、冷却器启停状态和油泵运行状态应同时核对；同等负荷下油温持续抬升，且滤芯压差或箱体局部温度同步变化时，润滑不良和轴承摩擦增大应优先排查^[2]。巡检结论适合做故障分级入口，不能替代振动和油液复核。巡检记录还应保留负荷、风速、油泵状态和冷却风扇动作，便于下一次巡检比较同一工况下的变化，避免把环境温差误判为内部故障。

（2）高速轴振动频谱边带特征提取诊断法：高速轴转速高、啮合频率密集，对齿面磨损、断齿前裂纹和轴承滚道损伤较敏感。振动诊断先从时域波形中识别冲击、调制和幅值突变，再通过包络解调和频谱分析提取啮合频率、转频边带和轴承故障频率；齿面磨损通常使啮合频率及其边带能量升高，轴承损伤则会在特征频率及倍频附近出现重复冲击。振动频谱识别的

信号路径见图2。

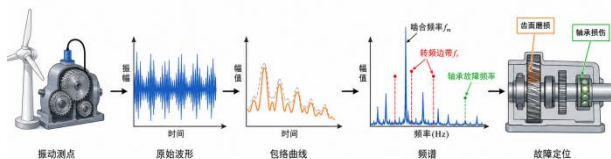


图2 齿轮箱振动频谱边带诊断路径

图2中,蓝色原始波形先转化为橙色包络曲线,再进入频谱识别;红色转频边带围绕啮合频率 f_m 分布,绿色轴承故障频率指向滚动轴承位置,说明齿面磨损和轴承损伤不能只用整体振动值判断,而要比频率成分与故障部位之间的对应关系。

(3) 油液磨粒污染状态监测诊断法:油液监测能够补充振动诊断难以覆盖的慢性磨损信息。取样时应区分运行油样、换油油样和滤芯截留颗粒,重点观察铁磁磨粒数量、颗粒尺寸、黏度变化、水分和污染等级;大尺寸切削状颗粒增加时,齿面剥落或轴承保持架磨损风险升高,细小氧化颗粒和黏度下降则更多指向油品老化与温度控制不足。油液结果应与负荷、换油周期和近期报警记录对照,单次异常不宜直接判定齿轮箱报废。当油样中铁磁颗粒增多而振动尚未越限时,应缩短复检周期并检查滤芯截留物;当振动边带和磨粒形态同时恶化时,齿轮箱内部检查的优先级应高于继续延长运行。

3 风电机组齿轮箱预测性维护策略

(1) 齿轮箱润滑油污染全周期管理:润滑油管理是齿轮箱维护策略的核心,控制对象包括油品选型、过滤精度、补油清洁度、在线温控和换油窗口。低温启动阶段要避免油液黏度过高导致供油迟滞,高温满发阶段要关注油膜变薄和氧化速率上升;滤芯更换不宜只按日历周期执行,压差、颗粒污染和油温趋势应共同决定维护窗口^[3]。补油、取样和滤芯拆装过程中若引入水分或粉尘,维护动作本身会成为污染源,由此加油工具、密封件和呼吸器也应纳入同一管理范围。油样颜色、气味和泡沫状态也可作为辅助线索,但必须与颗粒污染和温度趋势共同解释,避免把油品外观变化直接等同于内部损伤。

(2) 齿轮箱运行载荷分级定期保养:定期保养应根据机组载荷谱、运行年限和历史故障分级安排。低载频繁启停机组应重点检查齿面微动磨损和制动冲击痕迹,高载长周期运行机

组应关注高速轴轴承温升、油液氧化和冷却器堵塞;同一风场内处于湍流强度较高机位的齿轮箱,保养周期不宜简单复制相邻机位^[4]。分级保养把日常巡检、季度油样、年度内窥和大修拆检区分开来,使维护资源优先落到异常趋势明显的齿轮箱。保养计划还应区分新投运、稳定运行和老化服役三个阶段,新投运阶段关注磨合磨粒和紧固件复查,老化阶段则把轴承间隙、密封老化和冷却能力列为重点。

(3) 高湍流工况载荷调整与故障预防:高湍流、频繁偏航和电网扰动会使齿轮箱承受非平稳载荷,单纯更换零部件难以消除重复故障。维护策略应把运行控制参数与机械状态结合起来,必要时调整偏航对风精度、启动停机斜率和限功率策略,减少低速大转矩冲击;当振动趋势、油液污染和内窥检查同时指向异常时,维护决策应从继续观察转为复检或停机检修。齿轮箱多源状态分级维护逻辑见图3。

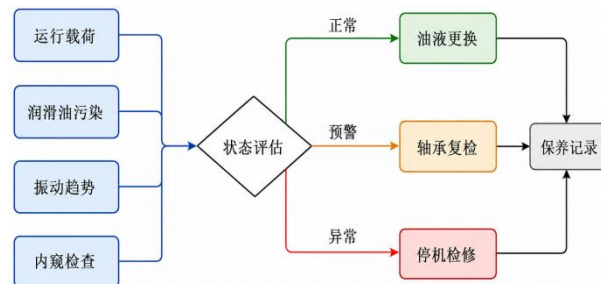


图3 齿轮箱预测性维护分级决策示意

图3中,运行载荷、润滑油污染、振动趋势和内窥检查先汇入状态评估节点,绿色、橙色和红色分支分别对应正常、预警和异常状态;油液更换、轴承复检和停机检修最终进入保养记录,说明维护策略应以多源状态分级为依据,而不是等到齿轮箱失效后再安排单次抢修。

4 结语

风电机组齿轮箱常见故障诊断与维护策略应围绕传动链结构、故障信号和维护动作展开。齿面磨损、轴承损伤和润滑油污染具有相互放大的特点,现场巡检、振动频谱和油液监测分别覆盖外观温升、动态冲击和慢性磨损信息;润滑油污染控制、载荷分级保养和高湍流工况调整能够把诊断结果转化为可执行维护安排。齿轮箱运行状态越复杂,越应把单点报警改为多源状态分级,减少无依据停机和带病运行两类风险。

参考文献:

- [1] 王光宇.风电机组齿轮箱常见机械故障与维护策略[J].电力设备管理,2025,(11):266-268.
- [2] 雷张伟,李牡丹.数据处理技术在风电机组故障诊断及预警中运用分析[J].科技创新与生产力,2026,47(3):140-143.
- [3] 包令华.面向小样本场景的风电机组振动信号故障诊断方法研究[J].新发现,2025,(18):25-27.
- [4] 王加帅.风电场双馈风力发电机异常振动故障及排除措施[J].科技资讯,2025,23(15):86-88.