风电机组齿轮箱早期故障诊断与智能预警技术应用

武　军

内蒙古华电辉腾锡勒风力发电有限公司 内蒙古 呼和浩特 010000

【摘　要】：齿轮箱是风电机组传动系统的重要部分，长时间处在变载荷、变风速的复杂工况之中工作，故障率高并且运维成本大，是制约风电机组安全稳定运行的主要缺陷。本文对风电机组齿轮箱常见早期故障类型及特点进行分析，论述了振动监测、数据建模、智能算法等早期故障诊断与预警技术，用风电场工程应用案例验证了技术的可行性。结果表明，智能预警技术可以准确地发现齿轮箱早期的故障征兆，及时预测出设备劣化的趋势，大大减少由于故障引起的停机和维护费用，可以给风电设备智能化运维提供技术上的借鉴。

【关键词】：风电机组；齿轮箱；早期故障诊断；智能预警；设备运维

DOI:10.12417/2811-0528.26.21.001

引言

传统的运维模式是以定期检修、事后维修为主，定期检修存在过度检修、检修盲区等问题，事后维修容易造成故障扩大化，不能适应风电设备长期野外运行的特点。早期故障诊断及智能预警技术可以对齿轮箱的状态实施实时监测，并且可以提前预知故障的发生，由原来的被动维修变为现在的主动预测性维护，给风电场运行稳定性改善、运维成本削减以及设备寿命延长赋予了工程意义。

1 齿轮箱常见早期故障及特征

（1）轴承早期磨损故障：轴承是齿轮箱的主要承载件，它要承受齿轮箱工作时产生的交变载荷、温度变化、润滑剂与齿轮的摩擦等各种作用，是齿轮箱故障率最高的部件。早期故障多为滚动体、滚道的轻微点蚀、表层的微磨损、润滑脂的轻微失效等，没有明显的卡滞、异响等故障。设备运行时，只存在箱体局部振动幅值微小上升、轴承工作温度缓慢上升的细微变化，常规的人工巡检很难准确地发现。该类故障发展下来会使得轴承的间隙变大，摩擦增大，最终导致轴承卡滞或者抱死，引起传动系统失效。

（2）齿轮早期啮合故障：齿轮啮合传动时，受到风速突然变化引起的冲击载荷、润滑油膜过薄、油液中有杂质研磨等影响，齿面会出现一些小的划痕、表层微剥落等早期损伤，属于渐进性机械磨损故障。其核心早期运行特征就是齿轮固有的啮合频率略有偏移，振动信号中谐波分量不断增加，机组的发电效率出现轻微下降，没有明显的设备故障报警。如果长期不加以整治，齿面的磨损情况会逐渐变坏，由原来的局部磨损发展成齿面大面积剥落，乃至齿体疲劳断裂等严重事故，给机组的传动稳定带来很大影响。

（3）润滑系统隐性故障：润滑系统是保证齿轮箱正常运转的基础，润滑油变质、油液颗粒杂质超标、运行油温异常都是最常见的早期隐性故障，也是造成齿轮、轴承机械故障的主要原因。齿轮箱长时间在高温、高压的环境下工作，容易使润滑油发生氧化变质，野外恶劣的环境条件下沙尘、金属颗粒混入油液，造成油液中的杂质含量超标。早期故障阶段设备整体运行状态没有明显的异常，只是油温波动幅度增大、油液颗粒度指标小幅超标、部件摩擦损耗缓慢提高，长期运行会大大加快各种传动部件的疲劳损坏。

（4）箱体松动与渗漏故障：风电机组连续工作时所产生出来的高频振动，会慢慢造成齿轮箱箱体紧固螺栓出现轻微松动状况，箱体密封件也会因为老化而失效，从而引发微渗漏故障。该类故障早期特征非常隐蔽，只有箱体微弱的振动异常、箱体结合面微量渗油等现象，人工巡检很容易忽略。由于松动程度加重、密封性能不断降低，就会出现润滑油流失、外界杂质进入箱体等情况，从而加重内部运行环境的恶化。

2 齿轮箱早期故障诊断与智能预警核心技术

（1）多源运行数据采集技术：数据是故障诊断和预警的基础，对齿轮箱箱体、轴承座、油路等重要部位布置高精度传感器，随时采集各种各样的运行数据。主要包含振动数据、温度数据、油液状态数据、转速数据、机组发电功率数据，全方位体现齿轮箱的机械运转情况、润滑状况、工况负荷等各方面内容。利用高频次的实时采集以及数据清洗，剔除掉环境干扰、设备偶然波动造成的无效数据，给故障分析建模提供准确的数据支持。

（2）信号特征提取与故障诊断技术：齿轮箱早期故障信号很小，很容易被工况变化、环境噪声所掩盖，必须依靠专业的信号分析技术才能提取出有效的故障特征。采用时域、频域联合分析的方法，将振动信号进行分解降噪，得到振动峰值、

有效值、频率偏移量等主要的特征参数，准确地把正常运行波动和早期故障异常信号区分开来。对润滑故障进行油液参数趋势分析，发现油温、油质缓慢劣化的规律，解决传统静态阈值判断适应性差的问题，实现隐性故障的精准诊断。

（3）智能建模与趋势预警技术：根据大量的正常运行数据和故障样本数据来建立齿轮箱健康状态评价模型以及趋势预测模型。利用机器学习算法来挖掘运行参数和设备故障之间的关联规律，创建出动态预警阈值体系，代替传统的固定阈值判定方式。模型能够对设备实时运行状态同标准健康状态间的差异展开实时比对，追踪参数劣化趋向，依照偏差程度做出预警等级判定，提早预估故障到来的时间及种类，给予运维人员足够充裕的检修时段。

3 工程应用案例分析

以北方某山地风电场 2.0MW 双馈风电机组为应用对象，该风电场共有 33 台机组，齿轮箱故障率高、隐性故障多、运维难度大。为了克服传统运维的弊端，在整个场地上部署齿轮箱智能故障诊断与预警系统，对系统实施为期 12 个月的工程应用测试，可达成数据即时采集、故障自动诊断、等级预告、趋势剖析等一系列功用。

（1）应用效果数据统计：本次应用期间系统共识别出齿轮箱早期故障隐患 28 项，包含轴承轻微磨损、齿面微磨损、润滑异常、密封微渗漏等各方面的隐患，在没有造成停机故障的情况下完成了所有的隐患整改工作。系统的预警准确率、故障识别的覆盖度等主要指标有很好的表现，应用前后设备运行以及运维数据对比见表 1。

表 1 应用前后设备运行以及运维数据对比

运维指标	应用前	应用后	优化效果
年度齿轮箱故障停机次数	16 次	3 次	下降 81.25%
早期故障识别准确率	58.20%	96.40%	提升 38.20%
齿轮箱年均运维成本	28.6 万元/场	15.3 万元/场	下降 46.50%
机组齿轮箱等效可利用系数	92.35%	98.12%	提升 5.77%

（2）典型故障预警案例：在应用过程中，系统对 12 号机组齿轮箱的运行数据进行了监测，发现该机组的轴承振动有效值有小幅上升的趋势，轴承温度比同工况的机组要高一些，并没有出现明显的异响以及功率异常。智能模型用特征对比、趋势分析来判断是轴承早期微磨损故障，输出二级预警提示。运维人员按照预警信息展开专项检查，查明轴承出现轻微点蚀磨损状况，立刻执行保养维修工作，防止轴承磨损变大导致的停机故障。本次故障预判比传统的检修模式早了 27 天，很好地体现了智能预警技术对于早期隐性故障的识别优势。

（3）应用优势总结：从工程应用结果可以看出，智能诊断预警技术比传统的手工巡检、定期检修方式更能发现齿轮箱早期微小的故障，可以很好地避免人工巡检的主观性和局限性。动态阈值预警模式可以适应风电变工况运行的特点，有效地降低了误报、漏报率。提前干预的预测性运维模式可以减少非计划停机，降低大件维修概率，从而提高风电场运维经济性以及设备运行可靠性。

4 结论

齿轮箱早期故障诊断与智能预警技术彻底改变了风电机组齿轮箱传统被动运维模式，依靠多源数据监测、智能特征分析、趋势预判的技术体系，可以很好地发现齿轮箱磨损、润滑异常、部件松动等各个方面的早期隐性故障。工程应用证明，该技术可以明显减少齿轮箱故障停机次数，提高设备可利用率，大幅度降低风电设备运维成本，具有很强的工程实用性以及推广价值。伴随着风电运维智能化程度不断提高，不断改进智能预警模型及算法，可以使得齿轮箱的全生命周期运维更加精准，给风电机组的安全、高效、经济运行提供强有力的保障。

参考文献：

[1] 李宗泽,徐志,王海龙.风电机组齿轮箱断齿故障机理与诊断方法研究[J].电气应用,2025,44(8):115-120.

[2] 严文超.基于多源异构数据融合的风电机组早期故障自主辨识方法[J].自动化应用,2026,67(4):119-121+125.

[3] 向玲,朱浩伟,丁显,等.基于 CAE 与 BiLSTM 结合的风电机组齿轮箱故障预警方法研究[J].动力工程学报,2022,42(6):514-521.