

Q: 在风力发电机齿轮箱的预防性维护中，如何通过振动特征分析识别行星级齿轮的早期点蚀故障？

A:

1. 数据采集:

- 使用三轴加速度传感器（频响范围 ≥ 10 kHz）在行星架非旋转侧安装点采集振动信号，采样频率至少为齿轮啮合频率的 10 倍（典型值 ≥ 20 kHz）。
- 同步记录转速信号（精度 $\pm 0.1\%$ ），确保阶次分析准确性。

2. 特征提取:

- 计算包络解调谱（Envelope Demodulation），重点关注行星轮通过频率（PPF）及其谐波： $PPF = \frac{Z_p f_r}{N_p}$ （ Z_p : 行星轮齿数， f_r : 行星架旋转频率， N_p : 行星轮数量）
- 监测边带调制现象：健康齿轮边带幅值应小于载波幅值的 10%，早期点蚀时边带幅值会增长至 20%-30%。

3. 阈值判定:

- 依据 ISO 10816-3:2009 标准：
正常工况：振动速度有效值（RMS） ≤ 2.8 mm/s（频率范围 10-1000 Hz）
预警阈值：RMS 增幅超过基线值 50%且持续 3 个采集周期（建议基线每季度更新）
- 结合峭度指标（Kurtosis）：当 Kurtosis > 4 时提示冲击性故障特征。

4. 验证措施:

- 执行动态扭矩加载测试（30%-120%额定扭矩阶跃），观察振动信号相位调制是否与负载呈线性相关，排除轴承故障干扰。
- 配合油液铁谱分析：若 $>150 \mu\text{m}$ 磨损颗粒浓度超过 ISO 4406 18/16/13 标准，需立即停机检修。

Q: 齿轮箱高速轴轴承更换后，应如何通过热成像技术验证装配质量？

A:

1. 预检要求:

- 轴承安装必须满足 SKF TMFE 100-2018 装配规范：

- 过盈配合干涉量：轴径的 0.8‰-1.2‰（高速轴典型值 0.05-0.08 mm）
- 轴向游隙调整至 0.03-0.05 mm（使用激光对中仪校准，偏差 $\leq 50 \mu\text{m/m}$ ）

2. 热成像检测流程：

- 在额定转速（通常 1500-1800 rpm）下持续运行 2 小时，使用长波红外热像仪（灵敏度 $\leq 50 \text{ mK}$ ）：
 - 测量点：外圈端面、保持架接触区、润滑油出口
 - 环境温度补偿：需扣除环境温度波动影响（参考 IEC 62464-1:2016）

3. 温度限值：

- 正常工况：
 - 外圈温度 \leq 环境温度 + 35°C ($\Delta T \leq 35\text{K}$)
 - 相邻测点温差 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ （异常装配会导致局部热点）
- 报警阈值：
 - 温升速率 $> 2^{\circ}\text{C/min}$ 持续 10 分钟
 - 绝对温度 $> 90^{\circ}\text{C}$ （矿物油）或 $> 110^{\circ}\text{C}$ （合成油）

4. 验证标准：

- 依据 AGMA 1010-E95 附录 F：温度分布应呈轴对称，周向温差 $\leq 8\%$ 最大值
- 停机后检查：轴向位移量变化 $\leq 0.02 \text{ mm}$ （使用千分表测量）