

# 风力发电机组齿轮箱故障分析及处理

石良策, 康纪黎, 冯大为

(五凌电力有限公司新能源分公司, 湖南 长沙 410029)

**摘要:** 风力发电机组齿轮箱作为关键传动设备,其可靠性对整个风力发电系统的运行效率和安全性至关重要。本文针对风力发电机组齿轮箱的常见故障进行了深入分析,包括齿面疲劳、胶合、轮齿折断、塑性变形、轴承损伤、断轴、油温高等,并探讨了故障产生的原因与处理措施。本文根据某风电场齿轮箱故障案例,提出了要建立齿轮箱油温预警及油样定期检测机制,并结合齿轮箱各级传动的在线振动状态监测及齿轮箱内窥镜检测,综合评估齿轮箱的运行状态,减少齿轮箱故障带来的经济损失,以提高齿轮箱的运行稳定性和可靠性。

**关键词:** 风力发电机组; 齿轮箱; 轴承; 润滑

中图分类号: TK730.8

文献标识码: B

文章编号: 1672-5387(2024)06-0101-03

DOI: 10.13599/j.cnki.11-5130.2024.06.029

## 0 引言

风力发电机组中的齿轮箱是一个重要的机械部件,齿轮箱机构是现代机械中应用最为广泛的一种传动装置,具有结构紧凑、可靠性高、传动效率高等优点。其主要功用是将风轮在风力作用下所产生的动力传递给发电机并使其得到相应的转速。大型风电机组的叶轮转速一般较低,不通过齿轮箱增速,达不到异步发电机工作的转速要求。增速齿轮箱作为兆瓦级风力发电机组的关键备件,为保证风电机组经济稳定可靠运行,对齿轮箱的可靠性及运维技术有了新的要求,图1为齿轮箱结构示意图<sup>[1]</sup>。



图1 齿轮箱结构示意图

由于风力发电机组一般选址安装在高山、海上等风能资源丰富区,风资源为一种不受控能源,由于地形条件引起的湍流及阵风冲击较为常见,风电机组经常在工况恶劣的条件下运行。齿轮箱作为风电机组传动链重要大部件之一,一旦出现故障,维修时间长、成本高,因此对其运行稳定性与一般机械设备

相比提出了更高的要求。根据传统双馈风电机组发展过程中的积累,齿轮箱依旧是风电机组整个传动链系统的薄弱环节。因此,加强对齿轮箱的研究和维护保养显得尤为重要,图2为常见齿轮增速结构。

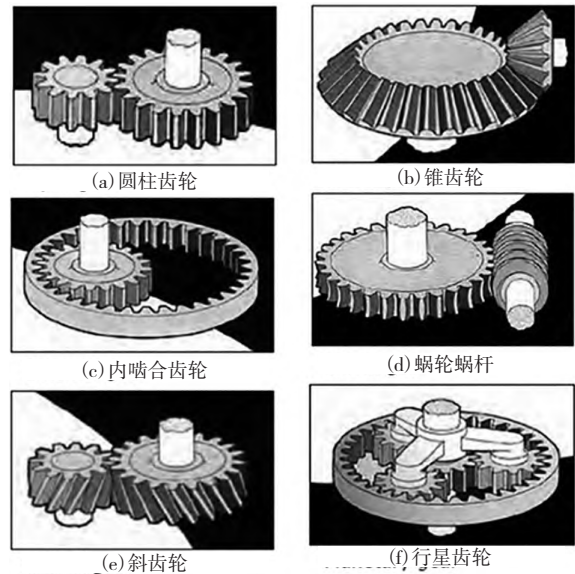


图2 常见齿轮机械传动结构

## 1 齿轮箱常见故障概述

齿轮箱结构主要由啮合齿轮、连接轴、轴承、箱

收稿日期: 2023-12-28

作者简介: 石良策(1987-),男,助理工程师,从事风电运维工作。

体、紧固件、油封等组成。轮齿常见故障根据轮齿的物理现象分为胶合、初期微点蚀、扩展性点蚀、机械磨损、疲劳裂纹、断齿等;滚动轴承常见故障为烧伤、保持架变形、滚珠脱落、电腐蚀等;轴常见故障为变形、开裂、磨损;箱体常见故障为变形、开裂,表 1 统计了齿轮箱各零部件故障占比情况。

表 1 各主要零部件故障统计

故障部件	比例	表现形式
轮齿	60%	胶合、点蚀、磨损、裂纹、断齿、其他
轴承	20%	保持架变形、滚珠脱落、电腐蚀、烧伤
轴	10%	变形、开裂、磨损
箱体	7%	变形、裂纹
紧固件、油封	3%	断裂、磨损

### 1.1 齿面疲劳

齿面疲劳是由于过高的接触剪应力循环作用,导致轮齿表面产生疲劳裂纹<sup>[2]</sup>,疲劳裂纹在应力作用下会继续扩展为金属剥落,导致机械传动过程中温升上升,噪音增大,最终断齿失效。

### 1.2 胶合

胶合是由于互相啮合齿面啮合线边界油膜失效,接触齿面发生金属融焊,导致金属表面撕落,胶合一般情况下为润滑不良或传动精度不够引起。

### 1.3 轮齿折断

断齿常由于作用在轮齿承受的应力超极限<sup>[3]</sup>,裂纹迅速扩展,最终导致断齿。齿轮断齿常见原因为过载、疲劳,部分为一定几率的随机折断,适当提高轮齿的表面硬度及轮齿韧性可减少断齿故障概率。

### 1.4 塑性形变

轮齿材料在应力作用下产生塑性流动,这种形变现象称为齿面或齿体的塑性形变。

### 1.5 轴承损伤

齿轮箱轴承为齿轮箱重要零部件,其故障率同样也在齿轮箱故障中占比较高。齿轮箱传动过程中,轴承套圈与滚动体表面承受交变载荷的反复作用,由于设计或安装工艺差、润滑条件不良、温度监测保护缺失等方面的原因,导致轴承出现点蚀、裂纹等缺陷,最终导致轴承失效,轴承失效同时由于冲击载荷可能导致齿轮副和箱体产生灾难性的破坏。

### 1.6 断轴

由于轴的材料杂质超标、强度不够、应力集中等原因,运行过程中出现过载或在交变应力超出材料

疲劳极限产生裂纹,最终断轴。

### 1.7 油温高

齿轮箱需配置完善的温度控制系统,控制齿轮箱油温低于 80℃,高于 10℃。轴承间的温差小于 15℃。通过齿轮箱冷却散热系统和电加热器来调节齿轮箱润滑油及关键部件温度,当润滑油温度高于一定值时,通过冷却系统对润滑油进行散热;当润滑油温小于一定值时,加热器启动对油池进行加热。

## 2 齿轮箱故障分析及处理措施

出现齿轮箱故障情况,一般综合从材质、设计、制造、工况、维护等多方面来进行原因分析<sup>[4-6]</sup>。齿轮强度、材质、热处理质量、啮合方式、安装精度、润滑条件等均为影响机械故障的因素,调整各传动零部件配合参数减少载荷集中,选择适当黏性的润滑油可降低轮齿的磨损。轮齿材质是否合格,啮合部位的硬度及精度是否满足要求;轮齿设计载荷、安全系数及装配精度是否满足要求;齿轮箱运行工况,比如齿轮油润滑条件、温度数据、振动数据有无异常。例如齿轮箱出现异常高温故障,首先要确定温度监测是否准确,确定高温是否真实存在。如果确实存在高温,则需要检查润滑系统是否正常,各主要润滑点处,必须要有足够的油液润滑和冷却。对润滑油本身的散热冷却系统也要仔细排查,是否由于润滑油本身温度高导致各部件润滑冷却效率降低。其次检查各传动部件有无干涉卡滞情况,传动过程中有无异常噪音。还要排查设备有无异常振动,传动链对中性及连接螺栓有无松动。

为保证齿轮箱运行寿命,要充分发挥状态检修的优势,综合运用化学试验、人工巡检、油温监测、在线振动诊断、齿轮箱内窥镜监测等多种手段,形成一套科学系统的大部件预警机制,根据设备状态采取针对性的运维技术手段确保齿轮箱的安全稳定运行。

### 2.1 齿轮箱故障案例

根据某风电场在线振动诊断时域图谱可得该齿轮箱低速轴加速度值有明显冲击,初步判断为齿轮箱低速轴存在轮齿开裂或者断齿情况。

现场开盖检查发现齿轮箱低速轴行星轮断齿。

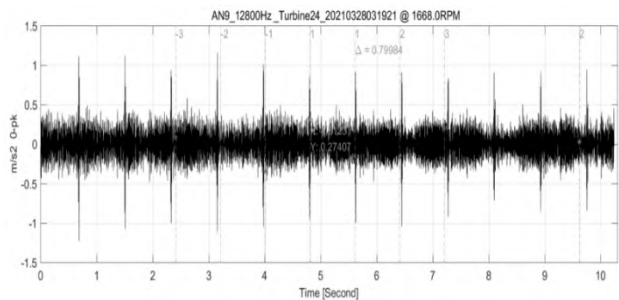


图 3 某风场机组在线振动诊断时域图

根据损坏的齿轮箱低速轴样品进行检测分析齿工作面硬度,得到梯度曲线如图 4。

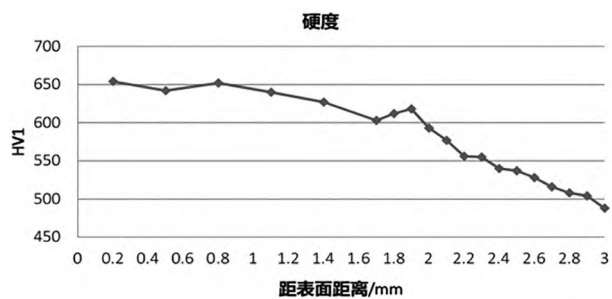


图 4 齿工作面硬度梯度曲线图

对断齿的化学成分、硬度、金相、宏观检测及 SEM-EDS 检测。通过硬度梯度检测齿轮表面及心部硬度无异常,金相检测齿面渗碳、晶粒度及氧化深度满足要求;疲劳源区能谱点分析发现轮齿断裂源处存在较多 Al、O 元素,氧化铝杂质,对轮齿的疲劳特性存在较大影响,产生疲劳裂纹并扩展为断齿。

表 2 疲劳源区能谱点分析结果

	O	Mg	Al	Cr	Fe
1	2.28	/	2.13	2.08	93.5
2	2.59	/	2.33	1.89	93.18
3	32.88	/	22.38	2.89	41.85
4	2.08	/	0.83	2.29	94.81
5	3.91	0.69	3.26	1.69	90.45
6	/	/	/	2.14	97.86

2.2 齿轮箱的润滑

轮齿在传动过程中啮合面并非直接接触,接触面中间通过润滑油形成保护油膜。轮齿传动因滚动和滑动摩擦会产生一定的热量。如果这些热量没有及时排出会导致热量堆积,高温会直接影响材料的理化性质,降低轮齿和轴承的寿命。因此齿轮和轴承在传动过程中必须采取有效的冷却方式来进行降温。这时润滑油一方面通过建立油膜对齿轮和轴承

形成润滑作用,另外通过油液循环带走设备产生的热量,防止热量堆积,起到冷却作用。

对于风电机组闭式齿轮箱来讲,为防止轮齿点蚀及胶合,必须选择合适的润滑油,通常情况良好润滑油应具备以下功能:工作温度下具备良好的黏性,有利于建立坚韧的油膜,有高的承载能力;低温情况下具有良好的流动性,防止影响泵送;吸收冲击和振动;良好的化学稳定性,防锈,抗腐蚀,抗氧化,清洁冲洗及冷却等。齿轮箱制造厂会根据齿轮箱的运行经验及实验研究推荐合适的润滑油。

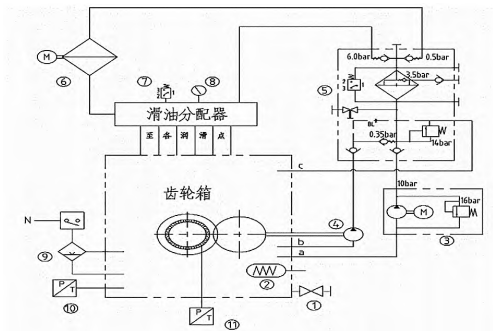


图 5 齿轮箱润滑系统示例原理图

3 结语

为保证齿轮箱安全稳定运行,精确掌握齿轮箱的运行状态,除了要建立齿轮箱油温预警及油样定期检测机制,还要辅助齿轮箱各级传动的在线振动状态监测及齿轮箱内窥镜检测,综合评估齿轮箱的运行状态,发现问题及时采取有效的运维手段预防设备劣化或制定检修计划,减少齿轮箱故障带来的经济损失。

参考文献:

[1] 陆俊华,李斌,朱如鹏.行星齿轮传动静力学均载分析[J].机械科学与技术,2005(6):702-704,709.  
[2] 朱亦钢.一种随机变化载荷的疲劳损伤累计方法[J].机械强度,2004(S1):32-35.  
[3] 钱桂安,王茂廷,王莲.用局部应力应变法进行高周疲劳寿命预测的研究[J].机械强度,2004(S1):275-277.  
[4] 周国栋,杨健.风电机组齿轮箱部件失效故障分析与处理[J].风能,2019(6):94-98.  
[5] 王德海,王晓莉.浅谈风力发电机组齿轮箱常见故障分析及检测方法[J].农业与技术,2015,35(21):48-50.  
[6] 蒙宣伊,龙辛.风机齿轮箱故障原因浅析[J].电力技术,2010,19(8):76-77.