

# 风电齿轮箱检修方法的研究与进展

李 奇

中车福伊特传动技术(北京)有限公司 北京 102202

**摘 要:** 随着风力发电技术的快速发展,装机数量逐年攀升。风电齿轮箱作为风力发电机组的核心部件,其运行状态直接影响整个风电系统的可靠性和发电效率。本文综述了风电齿轮箱检修方法的研究现状与进展,重点探讨了振动与声音监测、油液磨粒监测、温度监测等状态监测技术,定期检修与保养维护等检修手段。通过对这些方法的深入分析,旨在为风电齿轮箱的高效、精准检修提供理论支撑和技术参考。

**关键词:** 风电齿轮箱;检修方法;研究与进展

引言: 风力发电作为清洁能源的重要组成部分,在全球能源结构转型中扮演着关键角色。然而,风电齿轮箱作为风力发电机组中的易损件,其工作环境恶劣,易发生故障,对风电系统的稳定运行构成威胁。因此,研究风电齿轮箱的检修方法,提高检修效率和准确性,对于保障风电系统的长期稳定运行具有重要意义。本文将从风电齿轮箱概述出发,系统阐述其检修方法与手段,并探讨未来的发展趋势。

## 1 风电齿轮箱概述及常见故障

风电齿轮箱,作为风力发电机组中的核心机械传动装置,扮演着至关重要的角色。它是连接叶片与发电机之间的桥梁,主要功能是将风轮叶片在风力作用下产生的旋转力矩转化为适合发电机工作的转速和扭矩,从而驱动发电机产生电能。风电齿轮箱通常位于风力发电机塔顶,处于叶片与发电机之间,结构紧凑且设计复杂。它由多级齿轮组成,通过齿轮的啮合传递扭矩和转速,其中低速级与风轮叶片轴相连,而高速轴则与发电机相连,通过多级齿轮传动实现能量的高效转换。确保发电机能够获得稳定的旋转动力。

在设计风电齿轮箱时,需要综合考虑多种因素,如风轮叶片的转速范围、风力变化、负载要求以及运行环境等。由于风力发电机常年在恶劣的自然条件下运行,如高山、荒野、海滩等风口处,经受着高速旋转、变化的风力和不断变化的负载,因此齿轮箱必须具备高强度、高精度和高可靠性的特点。它需要使用高质量的材料和精密的加工工艺,以确保在极端条件下仍能稳定工作。风电齿轮箱的性能直接影响风力发电机的整体效率和可靠性。它不仅要满足增速的需求,还要确保传动的平稳性和耐久性。在齿轮箱的运行过程中,可能会遇到齿轮磨损、断裂、轴承故障以及润滑油渗漏等多种常见故障。因此,定期对风电齿轮箱进行维护和检修显得尤

为重要<sup>[1]</sup>。

风电齿轮箱故障可总结为五类常见故障: 齿轮损伤、轴承损伤、渗漏油、螺栓断裂、油温和油压异常。

在齿轮损伤方面主要分为四类损伤,分别是点蚀、胶合、静止压痕和断齿。点蚀的特点是在齿轮表面有一些微暗的点状物,实际上是非常微小的凹坑,它的形成原因与齿轮表面的粗糙度以及油膜的厚度还有油液清洁度,齿面硬度有关系。发现点蚀情况应引起重视,对点蚀部位定期进行内窥镜检查,防止其快速发展为断齿。胶合的特点是在齿轮表面可以看到有一些细条纹状的痕迹,与轮齿的啮合方向是一致的,它的位置也是发生在齿面。胶合产生的原因主要是因为齿面间的高速重载,导致齿面的温度快速上升,以及润滑失效,还有较差的齿面的润滑状况,及齿面的硬度不够,都会产生胶合。胶合已属于较严重的故障,应及时更换受损齿轮部件。胶合静止压痕,它的特点就是在齿面形成细状的痕迹,这个痕迹是一种接触腐蚀,严重时候压痕周围还有一些点蚀。静止压痕也是风机运维里面经常出现的状况,造成这一现象的主要原因是长时间停机,很多的风机如果某一个部件发生故障之后修复时间较长,而导致长时间停机。各个啮合处,两个齿之间长时间啮合受力导致静止压痕。它的预防措施是: 在长时间停机的状况下,必须在一定的时间之内要对风力发电机进行空转,保证充分的润滑,转换它的接触面。断齿,它在齿轮损伤里面是最严重的齿轮损伤,直接导致齿轮箱的失效。

轴承损伤,也是经常发生的损伤现象,主要发生在滚珠以及轴承的滚道上。故障表现有严重磨损,也有静止压痕,还有滚珠的腐蚀这些特点。轴承的损伤大部分是因为润滑不充分,或超过极限载荷,轴承也容易损伤。还有需注意更换不同型号润滑油的时候,如果润滑油之间的互溶性不好,也会影响润滑效果。

渗漏油,导致渗漏油的原因很多,其表现主要是箱体结合处的渗透,及润滑冷却系统的管路渗漏。一般发生渗漏油时,首先要检查空气滤芯,大部分渗透油是因为空气滤芯堵塞造成箱体压力过大造成,如果更换空气滤芯后依然渗漏油,就需要检查各个密封部位,确认渗漏点及原因。例如齿圈、箱体的螺栓是否松动,还有密封胶条是否老化开裂、回油孔是否堵塞等。预防和维修措施为定期更换空气滤芯,定期检查齿轮箱易漏油处的状况,以及密封件状态。

连接螺栓损坏,因为齿轮箱是由有力臂、壳体、齿圈等组合而成,需要用螺栓结合。螺栓损坏也是容易发生的故障。产生的原因有:一、齿轮箱冲击载荷过大;二、螺栓本身的质量问题;三、在运维和安装的时未按规定力矩锁紧螺栓。有时候锁紧力矩过大,也会造成螺栓的断裂。

油温油压异常,如果齿轮箱油温油压出现异常,需立即停机对齿轮箱进行系统检查。润滑是保证齿轮箱正常健康运行的关键,在润滑不足的情况下继续运行会导致齿轮箱部件迅速失效。首先应检查是否存在漏油状况,导致油量不足。再检查整个润滑系统是否正常<sup>[2]</sup>。

## 2 风电齿轮箱的检修方法与手段

### 2.1 振动监测

在风电齿轮箱的检测技术中,振动检测是目前比较完善的一项技术。从原理上来说,不管在早期的初始失效,还是断齿后故障,振动频率都会改变,通过在齿轮箱上合理位置布置振动监测点,是可以在振动信息中判断出故障位置和故障形式的。齿轮箱中各个齿轮及轴承都有各自的振动频率,当出现断齿等异常情况时,故障位置的振动波幅必然增大。通过对频率及波形的分析,判断出故障位置,及故障性质。

### 2.2 噪音监测

风电齿轮箱在内部和外界的刺激下,除了产生震动,还会产生噪音,当噪音异常升高时也意味着齿轮箱内部发生异常。

### 2.3 内窥镜检测

使用工业内窥镜通过齿轮箱上的观察孔盖,可以将摄像头探入齿轮箱内对齿轮及轴承情况进行观察。可以直观的看到齿轮表面是否存在点蚀、断齿等情况。也可看到轴承的状态是否正常。是风电齿轮箱故障检测中最有效的手段之一。

### 2.4 油液磨粒监测

油液磨粒监测技术日益发展,对于提升风电齿轮箱的维护效率与运行可靠性至关重要。随着科技的进步,

传统离线检测方式虽能提供重要数据,但其局限性日益凸显,促使业界不断探索更为高效、实时的监测手段。在线油液监测系统,通过集成高精度磨粒传感器,实现了对风电齿轮箱内部润滑油状态的连续监控,极大地缩短了故障响应时间,降低了因停机检修造成的经济损失。在选择磨粒传感器时,需综合考虑其灵敏度、准确性、耐用性及成本效益。例如,电磁感应型传感器利用金属磨粒在磁场中的特性进行检测,适合检测大尺寸磨粒,但在微小颗粒识别上可能受限;而静电驱动型传感器则擅长捕捉微小颗粒,但对环境清洁度要求较高。光电型传感器通过光学原理分析油液中的悬浮物,具有高分辨率和快速响应的特点,但成本较高。超声波型传感器则利用超声波在油液中的传播特性,能够非接触式检测,适用于复杂工况。因此,结合风电齿轮箱的具体需求,合理选择并优化传感器技术,是构建高效在线检测控制系统的关键。

### 2.5 温度监测

风电轮箱不论是齿轮、轴承或是润滑油,工作的环境温度都不应太高,不然将减少齿轮箱的寿命。齿轮工作温度太高,必然会造成润滑油温高,导致润滑效果下降,进而造成齿轮工作温度的增加而损坏,但直接控制齿轮箱的工作温度相当麻烦,所以对于风电齿轮箱进行高温检测,就需要使用相应的温度传感器测试轴承上所加润滑剂的温度。温度检测感应器主要分为热电偶和红外线热成像两大类,其中的热电偶传感器必须和被检测物体进行热对接,而红外线图像感应器通过被测物体的热辐射热能,进行了非接触式检测,使用比热电偶传感器简便。国内在役的风电齿轮箱,一般都采用了热电偶温度传感器来检测润滑油和轴承之间的相对温度,从而可以做到对温度的有效检测<sup>[3]</sup>。

### 2.6 巡检机器人

在新时代背景下,面对风电行业的快速发展与资源有限的矛盾,巡检机器人开始出现。这类机器人集成了先进的传感器技术、智能算法与远程通讯能力,专为解决风电齿轮箱等关键设备的故障诊断难题而生。它们有的在机舱外部,对叶片等关键部件进行检查,有的在机舱内进行多元化、高精度的数据采集,包括振动、温度、油液分析等信息,还能实时分析这些数据,迅速识别潜在故障,极大地缩短了故障检测周期。巡检机器人的24小时不间断工作能力,更是企业运维管理的福音。它们能够在恶劣环境下持续作业,无需人工干预,有效填补了因人员不足或技能限制导致的监测空白期。通过远程监控平台,技术人员可以实时查看诊断结果,

制定维修计划,甚至进行远程指导,极大地提高了工作效率和响应速度。此外,机器人还能自动记录诊断过程与结果,为后续的设备维护、性能优化及人员培训提供宝贵的数据支持。

以上这些检测及监测手段根据需要综合运用,可以及时的发现齿轮箱存在的故障,进而及时进行维修。如果长期不对齿轮箱状态进行检测,小的故障本来可以在塔上进行维修最终会发展成为大的故障,导致齿轮箱失效,不得不进行下塔维修。例如高速轴齿面的点蚀剥落,如及时发现可以在塔上进行更换,但如果任其发展导致断齿,断齿造成的金属碎片颗粒会进入其他啮合齿面及轴承,导致其他齿轮部件及轴承的失效,就需要进行下塔维修。最终造成重大损失。

### 3 定期检修风电齿轮箱系统

风电齿轮箱是完整的机械系统,而齿轮箱功能若要以最大化的展现与发挥,其最重要保证一定是定期的设备检查保养工作。对风电齿轮箱系统要进行内部及外部检查,如利用内窥镜技术进行系统内部检测。外观检查的侧重点则是散热体系、润滑管路和紧固件及箱体的外观,判断齿轮箱是不是出现了非正常使用现象。检查人员通过开展定期、全面的排查检测,有利于防治齿轮箱的关键部件故障。保障齿轮箱及整个风力发电系统处于健康的运行状态。风电齿轮箱的维护周期必须进行科学合理的设置,结合风场的环境因素、齿轮箱的设计及实际运行的状态进行设置。甚至可以随着齿轮箱使用年限和状态的变化进行随时调整。避免过短甚至过长的维修保养运行周期。过长的齿轮箱的检验周期,将可能造成技术人员忽视的潜在重大机械故障。但如果规定了过短的检测检修周期,那么检修人员的人力资源将会遭到大量占用产生不必要的浪费。

### 4 做好风电齿轮箱的保养维护工作

风电齿轮箱的健康运行离不开定期的保养维护,日常维护一般来说1-3个月进行一次,需要检查齿轮箱的箱体外观是否存在渗漏油情况,各螺栓紧固件是否松动发生位移,包括管路线路固定是否松动。齿轮箱液位是否

在正常范围。齿轮箱表面是否有油漆脱落锈蚀情况。需要对油滤进行检查,同时必须要观察油滤上是不是有铁屑。如果发现油滤堵塞,必须要更换,说明润滑油可能出现异常。如果油滤上出现铁屑需进一步检查磁棒,风电齿轮箱一般在外部设一个磁棒伸到齿轮箱的内部,如果上面吸附了很多的金属粉末,或者铁屑,说明某一个部位磨损严重,需要引起高度重视,应立即进行内窥镜等检查。空气滤芯,也是很重要的一个部件,需要检查它是否干净,如果有堵塞,或者非常脏,也需要进行更换。还有长时间的停机和齿轮箱长时间的存放,我们必须每3个月手动盘车数圈,增加润滑,并防止静止压痕。机械泵长时间停机的时候也必须做好润滑。才保证风电齿轮箱的正常运行、性能充分发挥。一旦齿轮箱失效需下塔维修,会带来极大的损失。风电齿轮箱本身价格昂贵、再加上需下塔维修时高昂的吊车租赁费用,以及停机导致的发电量损失,及齿轮箱维修费用等。因此一定要将日常的检查、维保落在实处<sup>[4]</sup>。

### 结束语

综上所述,风电齿轮箱的检修方法正随着科技的进步而不断创新与完善。从传统的振动、油液、温度监测到现代的移动诊断机器人应用,检修手段日益智能化、精准化。未来,随着大数据、人工智能等技术的深度融合,风电齿轮箱的检修将更加高效、智能,为风力发电行业的可持续发展提供坚实保障。我们期待在科研人员和工程技术人员的共同努力下,风电齿轮箱的检修技术能够不断突破,为清洁能源的广泛应用贡献力量。

### 参考文献

- [1]杨春晖,徐震.振动监测技术在风电齿轮箱解体检修中的应用[J].上海电力大学学报,2021,165-175
- [2]范志锋,苏续军,张融.风电齿轮箱检修方法的研究与进展[J].机械强度,2021,43(02):261-267.
- [3]李培,李宏博,刘盟伟.基于可靠度约束的风电机组机会检修模型[J].电力系统保护与控制,2020,45(21):7-13.
- [4]翟晶,王曰辉,柴希.风电齿轮箱轴承检修中的判定综述[J].机械研究与应用,2020,30(05):133-134+137.