

兆瓦级风电机组主轴承选型及发展趋势

太原科技大学

王建梅，罗永成

重型机械教育部工程研究中心

【摘要】风电机组越来越趋于大型化，主轴承是传动链的主要承载部件，在风机安全稳定运行中发挥了至关重要的作用。本文简要概述了主轴承不同支承配置方式的承载特点，提出了未来轴承的发展趋势，为轴承研发以及选型设计提供了参考。

【关键词】风电机组；主轴承；配置方式；发展趋势

引言

随着风电行业的快速发展，风电机组更加趋向大型化、智能化、高塔化^[1]。风电机组主轴承是主传动链系统的关键部件，不仅承受外部风载传输来的载荷，而且承受主轴、齿轮箱的重力载荷，工况载荷复杂，同时需要保证至少 20 年的使用寿命，对轴承的设计、选型提出了更高的要求。为了提高轴承的使用寿命，学者们从不同角度对轴承进行了研究。徐芳^[2]等人建立了风力发电机传动系统齿轮轴承耦合动力学模型，模拟得到了各轴承的动态接触力。Chang Y H^[3]等人提出了一种并行卷积神经网络(C-CNN)，能够很好地判别轴承故障信号。Wildinson^[4]设计了一种故障诊断实验平台，通过分析扭矩、速度、振动等信号，判断主轴承以及齿轮箱的工作状况。米良^[5]等人基于泊松随机过程分析了随机变幅载荷作用下的风力发电机叶片寿命。高聪颖^[6]等人简单介绍了风力发电机变桨轴承的载荷谱处理方法。安宗文^[7]等人分析了 1.5MW 风机叶片载荷，利用多轴算法预测了叶片疲劳寿命。风力发电机固定端轴承与基座为过盈配合，过盈配合对轴承寿命

具有很大的影响。宁可^[8,9]等人基于厚壁圆筒理论研究得到了结合压力与过盈量之间的关系,并有效提高了风电机组锁紧盘的可靠性。Bai Z^[10]等人研究了考虑离心力以及温度影响的多层过盈配合接触压力算法。Xia Q^[11]等人从材料学的角度分析了多层金属复合材料的结合性能。王建梅^[12]等人采用解析算法与有限元数值方法对比分析了多层过盈配合的接触压力。Zhuo Y^[13]等人建立双列调心球轴承三自由度模型,研究轴承在启动和旋转中的动力学行为。秦大同^[14]等人建立了风电行星齿轮系统的动力学模型,分析了轴承时变刚度对系统的影响。Jones^[15]将拟静力模型的理论基础用于深沟球轴承,分析轴承在受到任意方向载荷时轴承滚动体与内外圈接触面的受力分布和变形程度。Andreason^[16]考虑圆锥滚子轴承内外圈偏移量,研究低速旋转下轴承内外圈、滚子的变形。Liu^[17]在前人的基础上研究高速旋转轴承,考虑了滚子的离心效应和陀螺力矩的影响,分析了轴承载荷分布和应力变形。Shelofast^[18]研究了调心滚子轴承的接触问题,将载荷施加在滚动体上,建立平衡方程求解滚子的位移,确定了轴承出现故障的位置。

本文对目前各大主机厂商采用的主轴轴承布置方式进行简要概述,同时提出了未来轴承的发展趋势,为轴承研发以及选型设计提供了参考。

1 主轴轴承支承方式分析

目前兆瓦级风电机组主轴轴承主要的支承方式有三种:三点式支承、两点式支承、单点式支承^[19]。其中,三点式支承方式多用于小兆瓦风机,单点式支承越来越多地应用于大兆瓦风机。三点式支承为主传动链由一个主轴轴承和齿轮箱两边的弹性支承,两点式支承为主传

动链由两个主轴轴承支承，单点式支承为主传动链由一个主轴轴承支承。各风机制造商根据风机外形、制造成本、安装工艺等因素选择合适的布置形式。

1.1 三点式支承

主轴轴承采用一个调心滚子轴承，主轴轴承和齿轮箱两边的弹性支承共同承受主传动链的重量以及外部风载。该布置方式结构简单，装配要求不高，齿轮箱两边的弹性支承能够抵抗外部风载产生的弯矩。缺点是主轴动力学特性较差，系统刚性差，主轴将一部分载荷传递给齿轮箱，所以对齿轮箱可靠性要求较高，否则将造成齿轮箱破坏，大大增加维护成本。该布置方式一般应用于低兆瓦风电机组。

1.2 两点式支承

(1) 调心滚子轴承+调心滚子轴承

轮毂侧调心滚子轴承轴向浮动，只承受径向力，齿轮箱侧调心滚子轴承同时承受轴向力和径向力。调心滚子轴承具有良好的调心性能，能够抵消一定的安装误差以及主轴挠曲产生的倾斜^[20]。该布置形式安装容易，能够抵消主轴因温度变化而产生的轴向尺寸变化。但是该布置方式刚性较差，需要相对长的主轴来抵消风载产生的弯矩^[21]，该布置方式广泛应用于各型号兆瓦级风电机组。

(2) 单列圆锥滚子轴承+单列圆锥滚子轴承

前后两个单列滚子轴承采用“面对面”或者“背对背”的安装方式，该布置形式能够承受较大的轴向力和径向力，系统刚性好，动力学特性较好；缺点是轴承采用负游隙安装，同时需要考虑温度变化造成的应力，安装要求较高，在风电机组的应用并不广泛。

(3) 圆柱滚子轴承+双列圆锥滚子轴承

圆柱滚子轴承能够承受较大的径向力，同时能够抵消热胀冷缩造成主轴的尺寸变化。该布置方式轴承定位可靠，动力学特性较好，但是安装难度较大，需要较好的对中性，通常需要一体式轴承座，前后两个轴承外圈座孔是一次性加工完成，目前在中等兆瓦级风机上应用较多。

(4) CARB 圆环滚子轴承+调心滚子轴承

CARB 圆环滚子轴承是 SKF 轴承公司开发的一种单列轴承，滚子稍带弧面，滚道轮廓为圆弧面，具有调心功能。该轴承只能承受径向力，不能承受轴向力，能够抵消温度变换产生的线性膨胀，同时也能有效缓解主轴挠曲产生的边缘应力，目前在英国 5MW 风机上应用已十分成熟，在国内应用较少。

1.3 单点式支承

单点式支承大多采用双列圆锥滚子轴承，该轴承承受所有主传动链重量以及外部风载，轴承直径较大。该布置形式能够承受较大径向载荷、轴向载荷以及倾覆载荷，但是成本较高，目前广泛应用于大兆瓦风机。

2 主轴轴承发展趋势

随着风电行业的发展，风电机组越来越趋于大型化，对风电的可靠性、经济性、安全性、长寿命等提出了更高的要求。根据目前风电行业目前主要的配置形式，未来风电轴承将会在设计、制造、选用、安装、寿命预测等方面有更加深入的发展，以下从四个方面进行简要论述。

2.1 轴承材料

轴承材料对轴承承载性能以及轴承寿命具有决定性的影响。轴承

材料不仅包含材料成分组成，还有材料纯度、材料晶体结构等。未来国内轴承发展的趋势一定是超纯化、多量化、定量化以及低成本化^[22]，提高轴承钢产品质量稳定性，减少次品率。建立轴承热处理数据库，提高轴承表面改性技术，进而提高轴承使用性能。研究不同金属成分对轴承性能的影响，提高轴承热处理工艺，研究轴承破坏机理以及加工对轴承材料的影响机理，提高加工工艺。

2.2 轴承结构

轴承一般由内外套圈、滚子和保持架组成，通过优化轴承的轮廓形状，可以减少应力集中，优化轴承承载性能，提高轴承寿命。另外，各大公司也在积极研发新型主轴轴承，以便满足风电机组实际工况，比如，SKF 轴承公司开发的 CARB 圆环滚子轴承，该轴承不仅像圆柱滚子轴承一样具有较大的承载能力，同时像调心滚子轴承一样具有一定的调心功能。随着滑动轴承技术的进一步发展^[23]，风电机组使用滑动轴承也将成为一种趋势。

2.3 智能化轴承

随着物联网时代的到来，轴承智能化已经是大势所趋。在保证轴承性能的前提下，在轴承上集成多个传感器，如转速、温度、振动载荷、噪音及润滑状态等传感器。目前许多学者利用时频-能量分析，频域分析，时频分析和人工智能方法对风力机主轴承的信号，主要包括振动信号和定子电流信号进行了分析，能够及早判断轴承故障^[24]，但是目前这些方法大多停留在实验室阶段。未来轴承将具有自反馈机制，能够做到自感知、自决策以及自调控^[25]，提高轴承寿命。

2.4 系统柔性化

随着计算机性能的大幅度提高，对轴承将会有更加全面的分析，

如考虑轴承套圈变形对轴承载荷分布的影响。系统柔性化分析需要考虑与主轴轴承相关部件的柔性变形,系统分析轴承载荷,更加准确预测轴承寿命。

3 结语

轴承的配置方式不仅由风机安装位置的风场条件决定,而且需要各个主机厂商根据制造技术、安装工艺以及成本控制等因素进行选择。本文简要概述了主轴轴承目前主要的配置形式,并从轴承材料、轴承结构、智能化轴承、系统柔性化四个方面进行论述,提出了未来轴承的发展趋势,为轴承研发以及选型设计提供了参考。

【参考文献】

- [1] 申屠东华,何先照,卢江跃,李晨曦,裘园.大型风电机组传动系统支撑方式特性分析[J].装备制造技术,2019(01):129-133.
- [2] 徐芳,周志刚.随机风作用下风力发电机齿轮传动系统动载荷计算及统计分析[J].中国机械工程,2016,27(03):290-295.
- [3] Chang Y, Chen J, Qu C, et al. Intelligent fault diagnosis of Wind Turbines via a Deep Learning Network Using Parallel Convolution Layers with Multi-Scale Kernels[J]. Renewable Energy, 2020: 205-213.
- [4] Wilkinson M R, Tavner P J. Extracting condition monitoring information from a wind turbine drive train[C]. International Universities Power Engineering Conference. IEEE, 2004.
- [5] 米良,程珩,权龙.基于泊松随机过程的风力发电机叶片疲劳寿命估算[J].机械工程学报,2016,52(18):134-139.
- [6] 高聪颖,王宇炎,李云峰.风力发电机变桨轴承载荷谱的处理[J].轴承,2012(10):19-20.
- [7] 安宗文,杨晓玺,寇海霞.1.5 MW 风电叶片多轴疲劳寿命分析[J].太阳能学报,2020,41(05):129-135.
- [8] 宁可,王建梅,姜宏伟.多层过盈连接的可靠性稳健设计研究[J].机械设计,2018,35(12):82-88.
- [9] Ning K, Wang J, Jiang H, et al. Multiobjective intelligent cooperative design for the multilayer interference fit[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019.
- [10] Bai Z, Wang J, Ning K, et al. Contact pressure algorithm of multi-Layer interference fit considering centrifugal force and temperature gradient. Appl Sci 2018; 8(5): 726.
- [11] Xia Q, Wang J, Yao K, et al. Interface bonding properties of multi-layered metal composites using material composition method. Tribology International 2019; 131:

251-257.

- [12] 王建梅, 陶德峰, 黄庆学. 多层圆筒过盈配合的接触压力与过盈量算法研究[J]. 工程力学, 2013, 30(09):270-275.
- [13] Zhuo Y, Zhou X, Yang C. Dynamic analysis of double-row self-aligning ball bearings due to applied loads, internal clearance, surface waviness and number of balls[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(23):6170-6189.
- [14] 秦大同, 杨军, 周志刚, 陈会涛. 变载荷激励下风电行星齿轮系统动力学特性[J]. 中国机械工程, 2013, 24(03):295-301.
- [15] Jones A B. Ball motion and sliding friction in ball bearings[J]. trans ASME, 1959.
- [16] Andreason S. Load distribution in a taper roller bearing arrangement considering misalignment[J]. Tribology, 1973, 6(3):84-92
- [17] Liu, Y, J. Analysis of tapered roller bearings considering high speed and combined loading [J]. Journal of Lubrication Technology, 1976, 98(4):564-572.
- [18] Shelofast, Statics and friction moment in nonideal spherical roller bearing, Trenie ILznos, V 19, n2, Mar-April, 1998: 194-199.
- [19] 俞黎萍, 石亦平, 刘瑞峰. 风电机组主轴承选型与设计分析[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(01):80-86.
- [20] 洛阳轴研科技股份有限公司. 全国滚动轴承产品样本:第二版. [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [21] 李达, 姜宏伟, 宁文钢, 王岳峰. 风电机组调心滚子主轴承匹配设计技术研究[J]. 机械管理开发, 2020, 35(10):1-3.
- [22] 李昭昆, 雷建中, 徐海峰, 俞峰, 董瀚, 曹文全. 国内外轴承钢的现状与发展趋势[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(03):1-12.
- [23] 王建梅, 黄庆学, 丁光正. 轧机油膜轴承润滑理论研究进展[J]. 润滑与密封, 2012, 37(10):112-116.
- [24] Liu Z , Zhang L . A review of failure modes, condition monitoring and fault diagnosis methods for large-scale wind turbine bearings[J]. Measurement, 149.
- [25] 朱永生, 张盼, 袁倩倩, 闫柯, 洪军. 智能轴承关键技术及发展趋势[J]. 振动. 测试与诊断, 2019, 39(03):455-462+665.