

大功率风电轴承技术创新之路

洛阳新强联回转支承股份公司技术总监 郝文路

那是 2008 年，位于河南省洛阳市新安县洛新工业园区的洛阳新强联开始研发风电机组 1.5MW 变桨轴承和偏航轴承，开启了洛阳新强联大功率风电轴承国产化创新之路。历时三年，2010 年 9 月 1.5MW 风力发电机偏航轴承和变桨轴承为明阳风电批量供货，2011 年 2 月 2MW 直驱式风力发电机变桨轴承、偏航轴承为湘电风能供货。2011 年 5 月，新强联成功研制出 2MW 直驱式风力发电机三排圆柱滚子主轴轴承，从此，大功率风电机组的三种大轴承：变桨轴承、偏航轴承，主轴轴承实现了批量国产化替代，我国的大功率风电机组三大轴承开始用上了国产轴承。

时间来到了 2019 年，国家发展改革委于 2019 年 5 月发布的《关于完善风电上网电价政策的通知》中提出“风电行业项目未在规定时间内完成并网将不再享受补贴”，且未来风电上网电价存在下降的可能，该政策催生了一波风电抢装潮。经过十余年的发展，新强联风电轴承产品从 1.5MW、2MW 起步，相继研制了 1.5MW、2MW、2.5MW、3MW 等直驱式、半直驱式、双馈式多系列风电机组变桨轴承、偏航轴承、三排圆柱滚子结构的主轴承产品，产品批量配套广东明阳、华仪风能、湘电风能、航天万源、东方电气、重庆海装等主机用户。得益于公司持续的技术创新和技术改造，先后完成两条风电轴承生产线，包括数控立车、数控钻床、数控铣齿机、五轴加工中心、数控磨床、轴承试验机、轴承检测设备、轴承清洗设备、恒温车间改造，轴承感应无软带淬火设备、龙门式三坐标测量仪，在 2019 年的抢装潮中为公司带来了新的发展机遇。2019 年公司产品产值大幅增长，产值达 6 亿元，也成为风电行业生产 2~3MW 风电机组变桨轴承、偏航轴承、主轴轴承的龙头企业。

2019 年我国海上风电也进入了由大到强的发展关键时期，为打破国外轴承企业垄断，解决高端风电主轴轴承受制于人的问题，尤其是加强核心零部件的国产化，改变大功率风电机组核心零部件依赖进口的现状。新强联在三排圆柱滚子结构风电主轴轴承技术积累的基础上，进行了海上 3MW 大功率风电机组双列圆锥滚子主轴轴承的研发。通过项目实施打破了国外技术垄断，实现了 3MW-5MW 大功率海上风电机组配套主轴轴承产品的国产化、规模化生产，填补了我国在此类产品上的空白，此研发项目被列入河南省省级重大科技专项。

通过 3MW 风力发电机双列圆锥滚子主轴轴承的研制，形成了大功率风电机组双列圆锥滚子主轴轴承成套设计制造技术。在项目实施过程中：通过试验研究材料性能，选用改性的 42CrMo 套圈材料和 20Cr2Ni4A 滚动体材料，改善材料力学性能和耐磨、耐蚀性能；设计了特大型双列圆锥滚子轴承套圈锻件的辗制装置，开发了风电轴承套圈近净成形锻造工艺，提高了套圈锻件机械性能和材料利用率。通过用双列圆锥滚子轴承滚道无软带中频淬火工艺替代贝氏体马氏体整体淬火和渗碳淬火工艺，提高了轴承寿命和可靠性，缩短了制造周期，降低了生产成本，减小了环境污染；通过对双列圆锥滚子轴承具有游动间隙的免焊接支柱式保持架的研究，提高了轴承保持架的承载力和减少了焊接变形对轴承寿命的影响；通过对轴承预紧控制方法的研究，确定轴承制造游隙的最佳值，有效控制了轴承的工作温度，减小了驱动功率损失，延长了轴承的使用寿命。

1.试验研究轴承套圈材料和开发特大型双列圆锥轴承套圈无软带中频淬火热处理工艺技术

3MW 及以上大功率海上风电主轴轴承承载情况复杂，承受较大的轴向载荷、径向载荷以及倾覆力矩，且工作环境恶劣，要求轴承有更好的承受混合载荷的能力。

根据 3MW 大功率海上风电主轴轴承承载情况复杂、工作环境恶劣，且要求轴承安装孔和油孔多的特点。分析目前用渗碳钢和高碳铬轴承钢存在的工艺性和污染性弱点。渗碳钢渗碳周期长、渗碳不均匀、周期长、污染大，淬火后套圈变形大、淬火组织不均匀，且淬火后硬度高，导致钻孔困难、加工成本高。高碳铬轴承钢也存在淬火后孔难加工的问题。采用中碳合金钢 42CrMo 添加一定比例的镍元素，通过材料成分的改进，材料抗拉强度提高 30%，屈服强度提高 80%。研发的改性新材料，采用中频淬火热处理，加工成本低，质量稳定可靠，淬硬层深度可达 6-10 毫米，淬火组织均匀，热处理时间短，能耗小，减少了对环境的污染。

传统的中频淬火工艺，加工后套圈存在软带，软带部位硬度一般在 20HRC 左右，这个部位抵抗辗压能力弱，在长时间交变载荷作用下，淬火软带易产生早期疲劳而失效。为此，开发了圆锥滚子轴承套圈滚道无软带中频淬火工艺及配套的淬火装置。将两个感应器置于同一点加热，套圈滚道温度达到淬火温度后，两个感应器分别绕轴承套圈沿相反方向旋转，边旋转边淬火，两个感应器旋转 180° 会合后，短暂停留保温，再同时沿径向离开工件。该技术的实施消除了套圈的软带，确保了淬火硬度、淬硬层深度、淬硬层均匀性等技术指标，满足了设计要求，为复杂恶劣工况下长寿命轴承的使用提供支撑。

2.开发了大功率风电轴承套圈近净成形锻造工艺技术

3MW 双列圆锥滚子轴承直径接近或大于 2m，特大型轴承套圈的锻造是双列圆锥滚子轴承制造中的难题也是影响产品机械性能和制造成本的重要因素。

开发了大功率风电轴承套圈近净成形锻造工艺技术。基于有限元仿真技术，建立精确有效的热力耦合三维有限元仿真模型。仿真模拟给出大型环件轧制过程中的应力、应变、温度场和力能参数等，优化辗制工艺和控

制参数，建立大型环件轧制过程中进给速度控制曲线和直径增长速度控制曲线，为辗扩工艺提供依据，解决辗扩不成形、成形缺陷等技术问题。设计开发大型重载精密环锻件的辗制切割装置、多异型沟槽辗扩装置，采用由液压控制元件、油缸、反馈元件等构成闭环数控辗环系统，精准的控制产品的热态尺寸，调节产品的实时温度，从而达到精准控制其形变量，冷却收缩后实际测量尺寸符合工艺要求。采用近净辗制工艺技术，材料利用率提高 20%以上，材料抗拉强度、屈服强度提高 15%以上，加工成本降低 15%。

3.研究开发免焊接支柱保持架

轴承行业常用的焊接结构支柱式保持架，焊后内应力大、变形大轴承工作时，滚子与支柱会发生干涉，且焊缝存在开裂的风险。支柱焊接结构的主轴轴承失效的主要原因就是焊缝开裂和保持架变形导致的保持架磨损失效。

设计开发了免焊接支柱保持架设计和配套加工检测技术研究，设计的免焊接保持架包括两列支柱，分别采用左、右旋螺纹支柱联接片状保持架，防止轴承工作中支柱松动。同时，利用支柱与片状保持架孔在大锥角圆锥轴承结构的锁限位功能，以及合理设计的间隙配合，实现免焊接功能。消除了轴承在工作中的支柱开焊隐患，以及轴承运转过程中保持架对滚子的正确引导，保证轴承的回转精度和高可靠性。

4. 进行轴承预紧仿真分析和试验，合理控制游隙

合理游隙是轴承正常工作的关键因素之一。影响轴承游隙的因素：包括轴承安装方式、安装过盈量、润滑方式、转速、主机精度、环境温度、主机结构、使用中的磨损等。其中，风机主轴轴承采用安装孔联接方式，安装螺栓在预紧过程中，轴承套圈产生弹性变形，直接造成工作游隙发生变化，对这一因素考虑不周时会引起轴承工作时的振动和噪声，加速轴承磨损，缩减轴承的疲劳寿命。

通过分析轴承的制造游隙、安装游隙和工作游隙的变化因素，建立了轴承预紧模型，分析复杂因素下预紧力、接触载荷分布和工作游隙的关系，获取预紧力变化规律，保证合理的轴承刚度、工作游隙和低摩擦力矩，并在此基础上拟定了螺栓预紧试验大纲，制定了预紧试验规程。



附图 2021 年 7 月 7 日新强联四厂双列圆锥主轴轴承产品装配中

2021 年 3 月“3MW 风力发电机双列圆锥主轴轴承”项目通过了中国轴承工业协会组织的科技成果鉴定。专家委员会认为“该项目在大功率风力发电机双列圆锥滚子主轴轴承设计及制造技术方面实现了集成创新，整体技术达到国际同类产品先进水平。”

历时三年，我们研究开发的海上 3MW 风力发电机双列圆锥主轴轴承系列产品成功替代进口，2020 年实现了 800 余套的装机应用。通过该项目的实施洛阳新强联在风电轴承领域“高性能材料”和“高精度制造”方面取得了进一步的突破，2020 年，公司风电轴承产值突破 20 亿元，成功在创业板上市。

近三年，公司抓住资本市场带来的红利，加强研发队伍建设，加大研发投入，完善检测、实验功能，引进高精尖加工装备、建立建全轴承套圈精密锻件、保持器、精密滚动体、成品装配、试验检测的高端一体化产业链。为

公司的新产品开发、产品质量提升、市场占有率的增加奠定了坚实的基础。

三年来，新强联专注于风电轴承领域的新技术创新和新装备的开发与应用。集成创新，扩大改性新材料、近净锻造、无软带中频淬火工艺、高精度滚动体加工技术的应用范围，相继开发了大功率风电机组单列圆锥主轴轴承、调心滚子主轴轴承、增速箱轴承等系列产品，形成了 5-20MW 多种结构的全系列大功率风电轴承产品的生产能力，成为推动风电轴承国产化的主力军。