

我国风电轴承的现状与发展趋势

洛阳轴承集团股份有限公司

航空精密轴承国家重点实验室

董汉杰 宋华华 练松伟 刘菁 尤蕾蕾 张艺

控制碳排放、推动能源转型、实现碳中和目标已成为全球共识。习近平指出，我国新型能源体系加快构建，能源保障基础不断夯实，为经济社会发展提供了有力支撑。我国风电资源丰富，发展新能源潜力巨大。经过持续攻关和积累，我国风力发电技术和装备制造水平已经全球领先，建成了世界上最大的清洁电力供应体系，我国成为世界能源发展转型和应对气候变化的重要推动者。

一、风电行业基本情况

根据 Wood Mackenzie 统计，中国是全球风力发电规模最大、增长最快的市场，贡献了超过一半的市场份额。中国国家能源局的数据也显示，中国风电装机居世界首位，容量已达 4 亿千瓦。目前我国已经形成具有自主知识产权的大兆瓦级风电机组的研发能力。在“碳达峰”和“碳中和”的背景及相关风电等新能源行业发展政策的促进下，我国的风电产业已经进入规模化、快速发展的平价时代。风电作为清洁燃料与清洁电力的重要来源，必将成中国能源发展的主力军，从而使得未来风电新增装机容量稳定增长。

（一）我国风力发电的规划目标

“十四五”时期是我国加快能源绿色低碳转型的攻坚期，进一步确立了我国风电产业的战略地位。我国承诺二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值、2060 年前实现碳中和。明确 2030 年风电和太阳能发电总装机容量达到 12 亿

千瓦以上，大力发展风电等可再生能源已成为纵深推进能源革命、保障国家能源安全的重大举措，更是实现我国碳达峰、碳中和目标、践行应对气候变化自主贡献承诺的主导力量。

（二）我国风电近十年总装机容量及 2023 年装机情况

根据中国可再生能源学会-风能专业委员会公布的数据，截至 2023 年，中国风电场装机容量已达 47460 万千瓦，占全球总量的 40%以上，处于绝对优势地位。其中，陆上风电累计装机容量为 43690 万千瓦，占全部累计装机容量的 92.1%；海上风电累计装机容量为 3770 万千瓦，占全部累计装机容量的 7.9%。2023 年，全国(除港、澳、台地区外)新增风电装机 14187 台，容量 7937 万千瓦，同比增长 59.3%；其中，陆上风电新增装机 7219 万千瓦，占全部新增装机容量的 91%；海上风电新增装机 718.3 万千瓦，占全部新增装机容量的 9%。这表明中国风电场装机容量在近年来保持了稳定的增长态势。



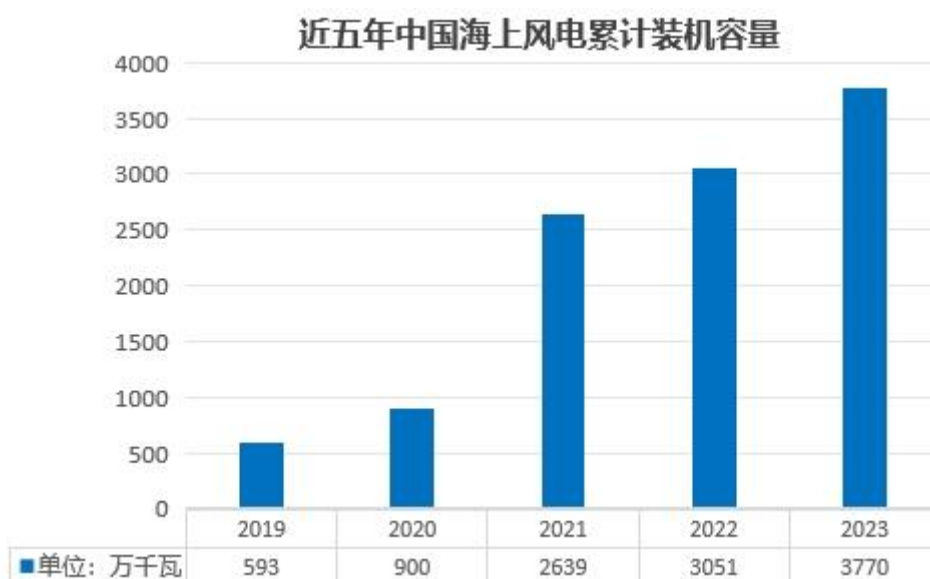
*数据来源于中国可再生能源学会-风能专业委员会

（三）我国风电近五年海上装机情况

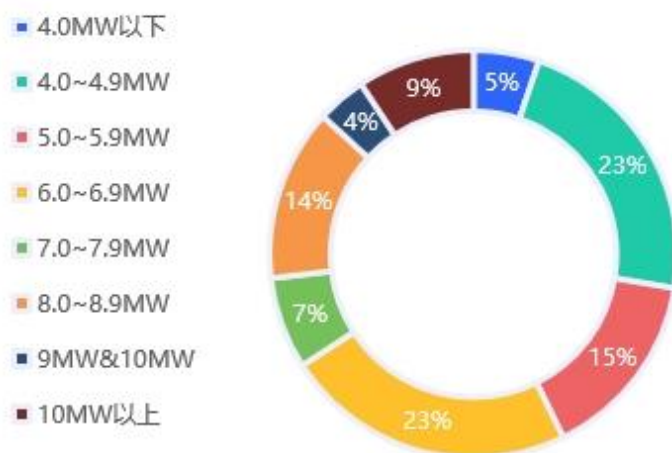
《“十四五”能源领域科技创新规划》提出集中攻关深远海域海上风电开发及超大型海上风机技术。2023 年我国风力发电海上装机 3770 万千瓦，5 年平均增幅 58.7%。新增装机海上风电单机容量 10MW 及以上占比由 2022 年的 12.1%提升到了 46.4%，主要集中在 11MW 和 12MW 机型，合计占比约 36.9%；12MW 以上风电机组装机容量占比为 6.6%。

2023 年新增最大单机容量由 2022 年的 11MW 提升到 16MW。海上风电机组中，小于 8.0MW 的占比 73.2%，同比下降约 16%；大于等于 8.0MW、

小于 9.0MW 占比 13.7%，同比增长 5.6%；10MW 以上占比 9.3%，同比增长约 8%。



截至2023年底不同单机容量海上风电机组的累计装机容量占比

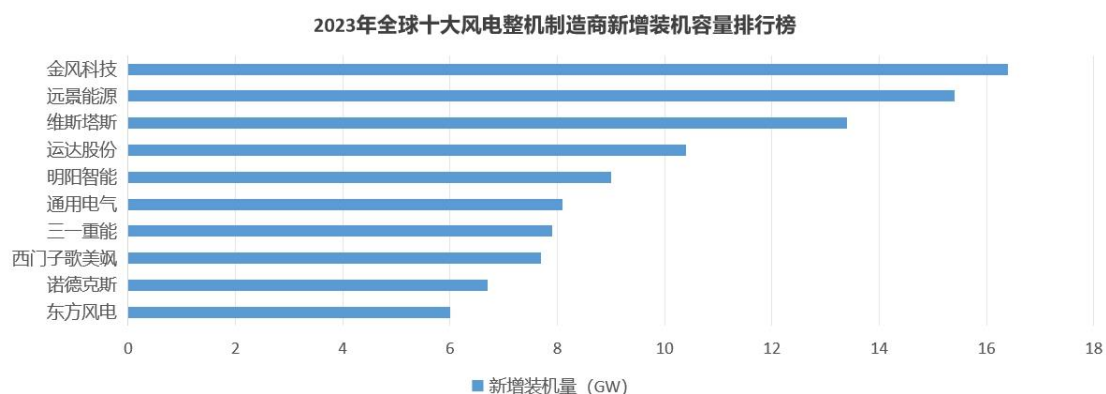


*数据来源于中国可再生能源学会-风能专业委员会

（四）我国风电装备发展情况

历经二十多年的发展，我国已成为全球风电装备最大制造国。风电机组的产量占全球的 2/3 以上，发电机、轮毂、机架、叶片、齿轮箱、轴承等主要大部件的产量占全球 60%~70%。我国风电产业国际竞争实力不断增强。

在全球装机排名前 10 家中，中国风电整机企业已经占到 6 家。



二、风电轴承行业基本情况

随着风力发电装备不断发展，带动了风电轴承的发展。我国轴承行业已经形成了风电轴承全系列研发和配套能力，基本满足了我国风电行业高速发展的需求。

（一）风电轴承装机部位及主要结构类型

风电轴承是风力发电机组中的关键部件，负责支撑和传递扭矩。根据安装位置和功能不同，风电轴承分为偏航、变桨轴承、主轴轴承、增速箱轴承、发电机轴承及驱动器轴承等类型。不同类型的风电轴承具有不同的特点和适用范围，满足了风力发电机组的需求。由于风机结构的不同，使用的轴承数量也有差异，一般来讲，单台风机中装有偏航轴承 1 套、变桨轴承 3 套，主轴轴承 1-2 套，增速箱轴承 18~23 套，电机轴承 2~3 套。

偏航变桨轴承主要有双排球轴承和三排圆柱滚子轴承 2 种结构类型；主轴轴承主要有圆锥滚子、调心滚子和圆柱滚子轴承；增速箱轴承主要有圆锥滚子、圆柱滚子和三点、四点接触球轴承。

（二）风电轴承自主化历程及里程碑

1997 年，我国首次研发成功偏航、变桨轴承，开创了风电轴承自主研发的先河。经过近 30 年的发展，我国已经实现了包括海上风电在内的偏航、变桨、主轴、增速箱等所有类型风电轴承的自主化生产。

在近 30 年的发展中，我国风电轴承是从千瓦级风力发电机轴承做起，通过不断地技术创新，实现了兆瓦级及海上大功率风电轴承的研发配套能力。从轴承的安装部位来讲，我国率先实现了偏航、变桨轴承的自主化生产；通过十年的努力，又实现了主轴轴承的自主化生产；2022 年增速箱轴承也取得了重大突破，实现了批量化生产。

1997 年我国首套风电轴承研制成功，实现了中国风电轴承由 0 到 1 的突破；2014 年完成了我国风电偏航、变桨、主轴轴承等国家标准的制定工作，科学地总结了我国风电轴承近 20 年的研究成果，完成了风电偏变、主轴及增速箱轴承国家标准，建立了我国风电轴承国家标准体系，实现了风电轴承标准化、系列化、规范化生产；2022 年实现了海上风电轴承的新突破，16MW 海上主轴轴承研制成功并装机应用，标志着我国大功率风电轴承关键技术从跟跑、并跑到领跑的跨越。1997 年我国首套风电轴承研发成功、2014 年风电轴承国家标准制定及 2022 年海上 16MW 风电轴承装机应用，这是我国风电轴承三个具有标志性的里程碑成果。

（三）我国风电轴承国内外主要生产、供应厂家

经过近 30 年的发展，我国风电轴承企业已经形成了全系列轴承研发配套能力。特别是洛轴、瓦轴、天马等企业，已经具备偏变轴承、主轴轴承、增速箱轴承及发电机轴承全系列产品研发配套能力。国内外轴承厂家在我国的生产配套情况见下表。

国内外主要风电轴承企业及配套产品情况

序号	轴承企业	主要产品范围			
		偏航、变桨轴承	主轴轴承	增速箱轴承	发电机轴承
1	洛轴	√	√	√	√
2	瓦轴	√	√	√	√
3	天马	√	√	√	√

4	新强联	√	√	√	
5	轴研科技	√	√	√	
6	人本			√	√
7	天成	√	√		
8	NKE			√	
9	FAG		√	√	√
10	SKF		√	√	√
11	TIMKEN		√	√	√
12	NSK		√	√	√
13	NTN		√	√	√
14	Rothe Erde	√	√		
15	Defontaine Group	√			

（四）风电轴承自主化发展趋势及未来市场需求

截止目前，偏航变桨轴承已经基本实现了国产化；主轴轴承的国产化率已达到 60%，预计未来还会继续提升；增速箱轴承也实现了重大技术突破，从 2022 年起已实现批量化生产；总体来看，风电轴承国产化率在逐步提升，国内风电轴承企业已替代国外品牌成为风电行业轴承的主要供应商。

年份 2020 2021 2022 2023 2024 预测

装机量 (GW)

71.67 47.57 49.83 77.1 80

偏变轴承

82.0% 86.6% 91.0% 95.0% 98%

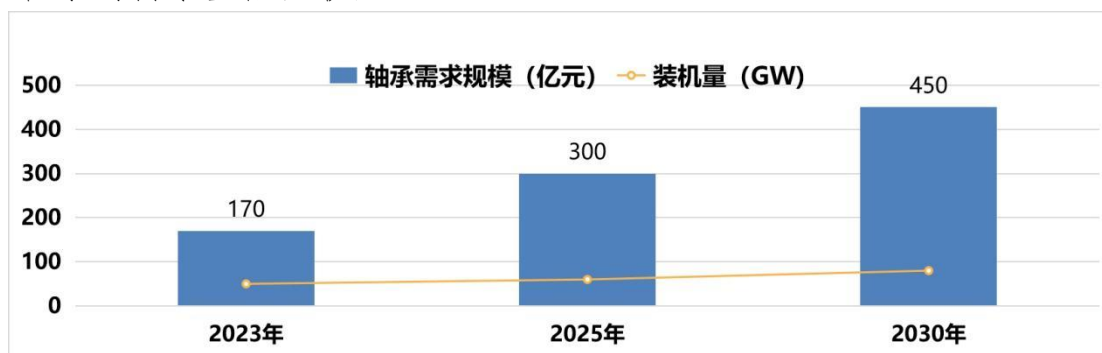
主轴轴承

53.0% 41.0% 32.0% 60.0% 70%

齿轮箱轴承

0.8% 2.0% 5.0% 15.0% 30%

根据《风能北京宣言》，在“十四五”规划中保证年均新增装机 50GW 以上，2025 年后，中国风电年均新增装机容量应不低于 60GW，到 2030 年预计达到 80GW。2023 年我国偏航变桨轴承、主轴轴承、增速箱轴承市场规模在 170 亿，到 2025 年将突破 300 亿，至 2030 年有望达到 450 亿。未来我国对风电轴承的需求量依然较大。



三、风电轴承已突破的主要关键技术

我国风电轴承已基本完成了从设计、制造、试验到应用的技术体系建设。在设计技术方面，风电轴承早期以测绘模仿设计为主，经过多年的努力，已掌握了以刚性支撑为假设条件的轴承设计技术，开发了 4MW 以下系列风电轴承产品，随着风力发电机功率的不断增长，目前轴承行业已具备了开展柔性支撑下的风电轴承设计及分析技术能力。在风电轴承材料方面，我国已经从最早的 GCr15、GCr15SiMn、42CrMo 发展到目前的高淬透轴承钢 LYC3、LYC4、LYC5，可实现风电轴承的马氏体、贝氏体、贝贝、马贝等多种组织的热处理，满足了大功率风电主轴及增速箱轴承材料的要求。在制造技术方面，从以精密制造技术研究为主，目前已逐渐发展到了以抗疲劳制造技术研究为主的技术研发阶段。在试验技术方面建立了完善的风电轴承性能及寿命试验体系。

（一）风电轴承设计及分析技术

风电轴承设计技术已解决了数字化载荷分析处理技术难题，实现了对海量、复杂轴承疲劳载荷谱数据文件的等效处理；柔性支撑下多参数风电轴承

优化设计及分析技术，以额定动载荷为目标函数，在柔性支撑服役工况下进行多参数设计，突破了轴承刚性套圈的设计假设，提出了计及轴系和支撑的一体化柔性轴承设计计算体系，实现了大功率风电轴承的精准计算；挡边减摩优化及滚子运行姿态控制设计技术，改变了以往球基面及直线挡边设计，优化了滚子球基面半径和接触位置，提高表面质量，改善了润滑状态，减少了摩擦和发热；整体式免扩张保持架结构设计技术，彻底解决了特大型保持架压装过程中接触表面易损伤难题，提高了轴承装配技术水平，保障了风电轴承高可靠性要求；保持架动力学分析技术，采用动力学方法对保持架进行受力分析，确保保持架各梁的安全性；风电轴承多元素轴系预紧设计分析技术，考虑了自重、配合、配重、后轴系等多因素对轴系轴向安装预紧量影响，通过计算分析，对不同风力发电机组采用一对一精准预紧，确保轴系计算预紧量，实现轴承在复杂工况下的长期无忧运行。

（二）风电轴承制造技术

在风电轴承制造技术方面，实现了一系列关键技术突破。大凸度风电滚子对数曲线加工技术，解决了大凸度圆锥滚子、调心滚子母线对数曲线高精度加工技术难题，并已经批量化工程应用；风电轴承“滚动体置换”负游隙控制技术，实现了轴承负游隙的精确控制；风电偏航、变桨轴承摩擦力矩控制技术，完成了轴承内外套圈接触角偏差、沟道直径偏差、沟曲率偏差、沟道平行差和不同的负游隙设计对摩擦力矩的影响规律以及不同密封结构、密封压下量、不同轴承尺寸规格等因素对摩擦力矩的影响规律总结，实现了风电偏航、变桨轴承对摩擦力矩的精确控制；风电轴承发黑膜厚数字化检测技术，开发了一种风电轴承发黑膜数字化精密检测关键技术，克服了传统称重法检测不准的难题；在风电轴承抗疲劳制造技术方面也取得了突破，表面残余压应力控制技术，实现了轴承套圈滚道表面压应力不低于-500MPa，均匀性不大于 250MPa 的技术目标；高精度无损检测技术，开发了高灵敏度无损检测

方法，大幅提高了轴承零件表面和内部各类微细缺陷的检测灵敏度和检出率，满足了风电轴承高标准要求。荧光磁粉近表面深度由 1.2mm 提高到 1.6mm，有效降低检测盲区。超声相控阵探伤缺陷由 $\Phi 1.0\text{mm}$ 提高到 $\Phi 0.5\text{mm}$ 。

（三）风电轴承材料及热处理技术

在风电轴承材料及热处理方面，开发了高淬透性轴承钢 LYC3、LYC4、LYC5，解决了严重制约轴承行业大尺寸风电轴承生产的重大技术难题，针对轴承不同的使用工况，开发了风电轴承的马氏体、贝氏体、贝贝复合、马贝复合等多种组织的热处理技术，满足了大功率风电主轴及增速箱轴承材料的要求。无软带表淬轴承钢已初步开始应用。

四、风电轴承技术发展趋势

根据风电行业的发展需求，风电轴承未来将向着自主化、标准化、通用化、高可靠性、长寿命、高精度、智能化、低成本方向发展。风电轴承技术研究的重点是数字化设计技术、先进材料及先进热处理技术、抗疲劳制造技术、先进装配性能优化技术、试验技术和智能运维技术。

（一）风电轴承设计技术

随着风机功率的不断提高，大功率风电机组传动链轴系普遍具有柔性特点。在外载荷的作用下，轴系、支撑壳体以及轴承在运转过程中会出现较大的变形，造成局部应力增大，为了满足风电市场发展需求，需继续开展柔性支撑服役工况风电轴承设计理论及技术研究；为了满足风电行业高水平、高质量、低成本运行，对轴承运行过程进行实时监控，准确掌握风电轴承的运行状况，风电轴承智能化设计技术将是未来研究的重点；同时随着我国装机总量的不断增加及风机运行维护高峰的到来，开发适合风电维修市场的轴承新结构，满足维修市场高效、低成本的要求，也将是风电轴承设计技术重点研究的一个方面。

1、柔性支撑服役工况风电轴承设计理论及技术

风电轴承设计需突破轴承刚性套圈的设计假设，建立计及轴系和支撑的一体化柔性轴承设计计算体系，开展风电主轴、增速箱轴承动力学分析，研究柔性支撑下风电轴承多参数优化设计及精准计算分析，实现大功率风电轴承的长寿命、高可靠性，保证风机安全运行。

2、风电轴承智能化设计技术

目前风机开发迭代速度明显加快，风场运行监控措施不能清晰及时地反映轴承实时状态，不能完全、及时预判轴承运行状况，为保证风机高效、安全运行，风机市场需要研究开发能够反映轴承运行状态的智能轴承。通过智能轴承技术，实现风电轴承运行状态的实时监控，降低运维成本。

3、风电增速箱滑动轴承设计技术

在增速箱轴承发展趋势方面，由于风电行业综合降本的要求，滑动轴承因其径向尺寸小、拆卸方便、易维护，“以滑代滚”是增速箱轴承的研究方向之一。与滚动轴承相比，滑动轴承承载能力强、综合成本低，安装滑动轴承的增速箱功率密度高，理论寿命无限，是增速箱轴承未来的技术研发方向。

4、面向维修市场的风电轴承设计技术

风电轴承维修往往需要大型吊机或者海上风电船进行吊装作业，维修成本一直居高不下，如何提高维修效率、减少吊装运维成本一直是业内追求的目标。因此面向维修市场的风电轴承设计技术研究，开发便于更换的风电轴承也是未来风电轴承设计技术的研究方向之一。

（二）先进材料及先进热处理技术

1、偏航、变桨轴承

随着风机功率的变化，风电偏航、变桨轴承的结构也随之发生着变化。5MW 以下风机多使用双排球转盘轴承，5MW 以上风机多使用三排滚子转盘轴承和偏航齿圈，未来轴承结构将向智能化三排滚子转盘轴承方向发展。

目前国内外偏航、变桨轴承套圈普遍使用 42CrMo 钢进行生产，进行表

面中频感应淬火。随着风力发电机功率的不断增加，偏航变桨轴承在结构方面发生变化的同时，开发性能优于 42CrMo 的高淬透性、高淬硬性表面淬火轴承钢是满足大功率风电轴承性能的研发方向；热处理技术方面，在解决好大功率风电轴承硬度和淬硬层深度难题的同时，对淬硬层硬度梯度进行优化研究，也是提高轴承的疲劳寿命研究方向。

2、风电主轴轴承

风电主轴轴承结构主要为调心滚子和圆锥滚子轴承，随着风机功率的不断增大，圆锥滚子轴承逐渐成为大功率风电轴承主要结构，这两种结构的轴承常用的材料及热处理为高碳铬轴承钢及整体淬火。为了满足风机行业的发展需求，降低成本，轴承行业在主轴轴承材料方面，未来要研究开发一种类似于偏航、变桨轴承 42CrMo 表面感应淬火材料，替代高碳铬轴承钢，开发无软带感应淬火技术，满足风电行业降本需求。

（三）抗疲劳制造技术

随着风电行业的不断发展，对轴承的寿命和可靠性要求越来越高，通过制造技术的进步，研究抗疲劳制造技术，包括表面完整性制造技术、残余应力控制技术、无损伤制造技术、表面改性技术是未来风电轴承制造技术的重点技术研究方向。

（四）先进装配技术

随着风电行业对轴承的要求越来越苛刻，轴承行业为了降低成本，提高效率，也对轴承装配技术提出了新的要求。面对风电轴承新的技术要求，无损伤装配技术、智能化选配技术是重点研究方向。无损伤装配技术重点研究的方向是保持加工表面在装配过程中少无损伤，通过无损伤装配技术，减少和降低轴承表面损伤，提高轴承的疲劳寿命；智能化选配技术重点研究的方向是充分利用智能化生产数据，通过计算机技术对套圈、滚动体进行自动筛选、自动成组、自动装配等先进的智能化装配技术，提高轴承的合套率、效

率及装配精度。

（五）智能运维技术

风电轴承智能运维技术是基于数字孪生与深度学习的状态监测与智能运维（PHM）共性技术。风电轴承智能运维的目标是最大限度地延长轴承使用寿命，降低运维成本。风电轴承智能运维技术未来的主要研究方向是数字孪生技术与预测和智能运维系统技术。

（六）试验技术

风机功率大型化趋势明显，风电轴承试验平台开发周期长，资金投入大，试验平台使用成本高，制约了传统试验平台的开发和轴承试验的开展。因此，数字孪生试验技术在风电轴承试验领域的前景向好，未来虚拟样机试验将大大提高轴承试验效率和有效降低轴承试验成本。风电轴承的数字孪生试验理论和技术研究是提高风电轴承试验效率和降低试验成本的有效途径，是风电轴承试验的迭代升级技术。

五、总结

随着“碳达峰”和“碳中和”进程的不断推进，我国风电行业也将在很长一段时间内保持快速增长；风电轴承也将在已有的设计、制造、试验、应用等技术的基础上进一步向着数字化、智能化、低成本等方向发展，以不断满足风电市场的需求。