

试论我国风电轴承产业高质量发展

中国轴承工业协会副秘书长 韩金科

一、引言

当前，我国经济和社会已全面步入高质量发展阶段，着眼于高质量发展进程中的新视角，冷静看待瞬息万变的国际国内发展环境，细致解析行业产业发展现状和存在问题，对于我们厘清思路、找准方向，从而作出正确决策是颇有裨益的。

从国际上看，我们正在经历全球百年未有之大变局。国际关系、地缘政治不断发生巨大变动，政治经济局势持续演变错综复杂，全球化进程进行着深刻调整，产业链安全面临多重风险。

从国内来看，我们应该认识到，进入高质量发展阶段，是基于国家整体发展水平的全局性科学判断。而具体到各行各业，发展不平衡和不充分的矛盾依然表现突出，亟待寻找破解办法。需要我们努力找准突破点，以点带线，由线及面，逐步构建和打造新发展格局，用创新驱动作为新动能，驶向高质量、可持续发展的快车道。

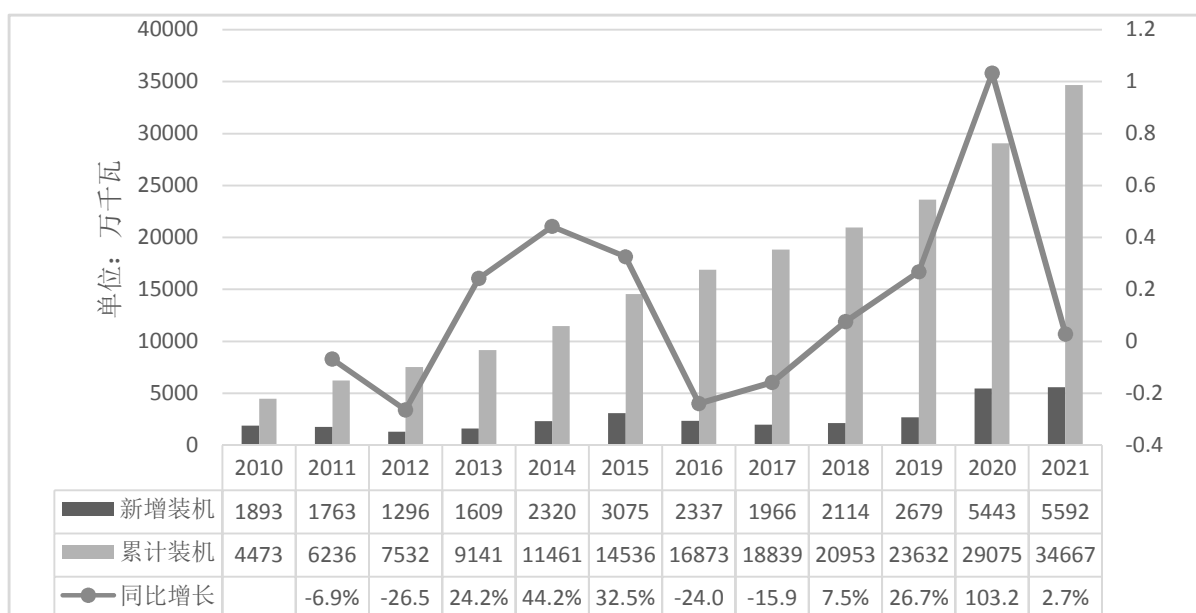
我国轴承工业已形成独立完整的工业体系，产销量自 2006 年以来一直居世界第三位。2021 年，全行业规模以上企业 1300 多家，从业人员 40 多万人，主营业务收入 2278 亿元，轴承产量 233 亿套。轴承进出口总额达到 124.17 亿美元，其中出口创汇 69.47 亿美元，进口用汇 54.7 亿美元。能够生产小至内径 0.6 毫米，大至外径 15 米，9 万多个品种规格的各种类型轴承。虽然轴承产业规模很大，却未能培育出与产业规模和国家发展水平相匹配的轴承产业竞争力，未能出现具有全球竞争力的轴承领先企业；进出口量很大，但缺

乏全球范围产业链和价值链的控制力；没有与进出口规模相适应的话语权和定价权；国内大部分轴承企业的产品都具有同质化的倾向。高端产品依赖进口的现象还很严重。对重大装备的支撑不足，中国轴承工业的产业与企业处于“大而不强”的尴尬局面，亟需破解。

风电产业是我国战略性新兴产业，风电机组是我国重大技术装备，风电机组配套轴承是核心关键零部件，风电机组配套轴承的自主安全可控是关系产业安全、国家经济安全的国之大事。轴承业者发扬产业工人的优良传统，迎难而上，使得风电轴承产业实现了从小到大的快速发展，取得了长足进步。风电轴承的发展状态是我国轴承产业发展的一个缩影，其发展路径及存在问题也具有一定的代表性。

二、风电产业蓬勃发展带来机遇

（一）风电发展迎来良好机遇



2010-2021 年我国风电新增和累计装机容量（引自:CWEA）

“2030 年前碳达峰，2060 年前碳中和”，习近平总书记向国际社会作出

的庄严承诺掷地有声，大力发展风电，是落实这一目标的重要途径。随着双碳时代的开启，作为主力军的风电迎来历史发展机遇期。2010-2021 年中国陆上风电度电成本下降了 66%，与传统化石能源发电成本基本持平甚至更具市场竞争力。大规模使用风电，既可以降低用能成本，还能够减少碳排放，增加就

业，拉动 GDP 增长，带动产业结构升级，经济、环境、社会效益显著。“十四五”期间确保风电年均新增装机不低于 5000 万千瓦，是落实双碳目标的最低要求。因此，在度过 2020 年“抢装潮”之后，我国风电产业仍将处于高速发展的态势。今后一段时间仍然是风电轴承的发展机遇期。

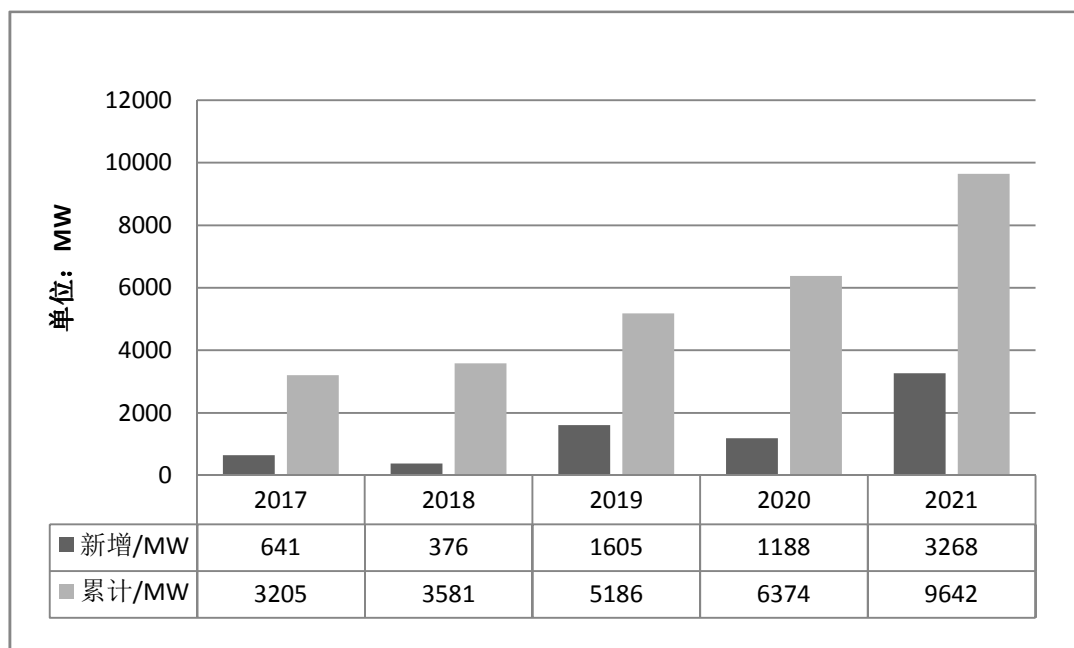
（二）国内风电装机规模稳居全球第一

2021 年，我国风电装机创新高，全国新增装机 15911 台，新增装机容量 5592 万千瓦。累计装机超 17 万台，同比增长 2.7%，占全球风电新增装机容量约 55%；累计装机容量超 3.4 亿千瓦，占全球风电累计装机容量约 41%。不论是新增装机规模还是累计装机规模，都稳居全球第一，继续驱动全球风电发展。我国风电产业的发展，虽受国家政策、消纳能力等因素影响，几起几落，但从中长期看，总体上处于波浪式高速增长的状态。

从上图中可看出，2021 年全国风电累计装机容量 34667 万千瓦，是 2010 年累计装机容量 4473 万千瓦的 7.8 倍。我国风电机组的研发和制造能力大幅提高，已基本实现系列化、标准化和型谱化，单机容量达到目前全球最大的 16 兆瓦级别，风电发电效率较十年前提高了 30%，成本下降了一半以上。我国已建立起一条涵盖风电开发建设、设备制造、技术研发、检测认证、配套服务的成熟产业链，是全球最大的风电装备制造基地，风电设备在满足国内市场的同时，出口至 30 多个国家，风电机组产量占全球的 2/3 以上，全球最大的 15 家风电装备制造厂商中有 10 家是中国企业。

（三）风电机组出口增势明显

2021 年，中国向海外出口风电机组 886 台，容量为 3268MW，同比增长 175.2%；截至 2021 年年底，中国风电整机制造企业已出口的风电机组共计 3614 台，累计容量达到 9642MW。



2017 年至 2021 年中国风电机组出口容量（引自:CWEA）

三、风电轴承行业需要精准定位

（一）我国风电轴承行业的现状

1. 从小到大，快速崛起，取得长足进步

我国轴承行业原来只有洛轴一家企业涉及风电轴承领域。2006 年以后，我国风电产业“井喷式”发展，我国轴承行业多家企业投入大量人力、物力，紧随风电产业的发展，进行风电轴承的研发制造，使风电轴承国产化取得长足进步。2020 年全国风电机组装机 20401 台，共需配套轴承 479424 套。据不完全统计，天马、洛轴、新强联、瓦轴、大冶轴、京冶轴承、洛轴所等国内轴承企业共产销风电轴承（以下简称国产风电轴承）77948 套，占比 16.3%。其中，按应用部位——

偏航轴承：国产轴承产销 12918 套，合 12918 台份，占总需求量的 63.3%；
 变桨轴承：国产轴承产销 52974 套，合 17658 台份，占总需求量的 86.6%；
 主轴轴承：国产轴承产销 10090 套，合 6727 台份，占总需求量的 33.0%；
 齿轮箱轴承：国产轴承产销 1902 套，合 119 台份，占总需求量的 0.58%；
 发电机轴承：国产轴承产销 91 套，合 45 台份，占总需求量的 0.2%。

天马、瓦轴等企业，研制的风电轴承不仅大量向国内风电整机制造企业供货，而且出口国外。

天马风电轴承出口交货值单位：万元（人民币）

年份	总计	出口地区			
		美洲	欧洲	澳洲	亚洲
2018	49106	22735	17061		9310
2019	70343	26784	22202	1238	20119
2020	76536	18466	41895		16175

2. 短板明显，由大到强任重道远

我国风电产业已领跑世界，我国风电轴承产业远远落后于主机产业发展步伐。

从 2020 年统计数据看，变桨轴承国产化率比较高，达到 86.6%，需进一步巩固提高。偏航轴承国产化率 63.3%，还有较大的市场开拓空间。主轴轴承国产化率 33.0%，基本上都是 3.0 兆瓦及以下，需要加大技术攻关和市场开拓的力度。齿轮箱轴承国产化率仅为 0.58%，发电机轴承国产化率仅为 0.2%，应该说，这两个领域的门槛，轴承行业还没有真正跨进去，对于我国轴承企业来说，这两个领域还有许多硬科技，甚至黑科技需要研发。

（二）要密切关注风电产业的发展趋势，主动调整、提前布局、适应变化

我国轴承行业对风电轴承的研发、制造已远远赶不上风电产业的发展。轴承行业要满足高速发展的风电产业需求，必须十分关注风电产业发展的趋势：

1. 产业集中度稳步提高

2021 年我国风电整机制造企业新增装机容量及占比

序号	制造企业	新增装机容量（万千瓦）	新增装机容量占比
1	金风科技	1138	20.4%
2	远景能源	815	14.6%
3	明阳智能	693	12.4%
4	运达股份	677	12.1%
5	电气风电	555	9.9%
6	中国海装	353	6.3%
7	中车风电	329	5.9%
8	三一重工	321	5.7%
9	东方电气	313	5.6%
10	联合动力	126	2.2%
11	哈电风能	68	1.2%
12	Vestas	67	1.2%
13	Siemens Gamesa	57	1.0%
14	许继风电	35	0.6%
15	华锐风电	32	0.6%
16	GE	9	0.2%
17	华仪风能	5	0.1%
	总计	5592	100%

金风科技、远景能源、明阳智能、运达股份、电气风电等风电整机制造排头兵企业的市场份额不断扩大，产业集中度不断提高，2021 年 CR5 已达到 69.4%，CR10 已达到 95.1%。我国有志于迈向高端的风电轴承制造企业应与这些风电整机制造企业以及风电整机终极用户风电开发企业这些“巨无霸”企业结成战略联盟。

1. 单机容量不断加大

2010~2021 年我国新增风电机组平均单机容量 单位：兆瓦

类型 年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
陆上 风电机组	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8	1.8	1.9	2.1	2.1	2.4	2.6	3.1
海上 风电机组	2.6	2.7	2.8	1.9	3.9	3.6	3.8	3.7	3.8	4.2	4.9	5.6

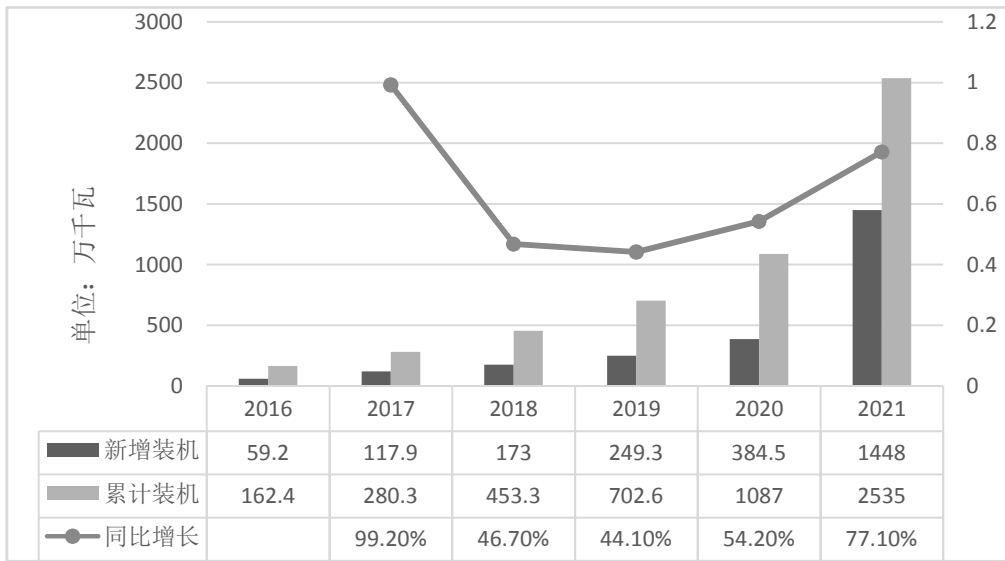
2021 年不同单机容量风电机组的新增装机容量占比

序号	单机容量	占比	备注
1.	1.5~1.9 兆瓦	0.15%	
2.	2.0~2.9 兆瓦	19.73%	
3.	3.0~3.9 兆瓦	40.11%	
4.	4.0~4.9 兆瓦	16.53%	
5.	5.0~5.9 兆瓦	8.14%	
6.	6 兆瓦以上	15.27%	

我国风电机组平均单机容量不断增大，陆上风电机组由 2010 年的 1.5 兆瓦，增大到 2015 年的 1.8 兆瓦，发展到 2021 年的 3.1 兆瓦；海上风电机组由 2010 年的 2.6 兆瓦，增大到 2015 年的 3.6 兆瓦，发展到 2021 年的 5.6 兆瓦。主流机型，陆上风电机组由 2010 年的 1.5 兆瓦，增大到 2015 年的 2.0 兆瓦，发展到 2021 年的 3.0-3.9 兆瓦；海上风电机组由 2010 年的 3.0 兆瓦，增大到 2015 年的 3.6 兆瓦，发展到 2021 年的 6.0-6.9 兆瓦。研发制造风电轴承的企业要使自身的技术水平、装备能力适应这种发展趋势。

3. 从陆地向海洋扩展

海上风速比陆地上快约 20%，发电量多约 70%。风力发电以固定式海上风机为主，但漂浮式海上风机逐步发展起来并有望成为主流，海上风电成本也在不断下降。海上风电不占用宝贵的土地资源，受自然环境因素的影响较小。风电产业从陆地向海洋扩展，从浅海向深海延伸，这在全球和我国都是一种发展趋势。



2016~2021 年我国海上风电新增和累计装机容量（引自:CWEA）

我国海上风电 2021 年新增装机容量已占新增装机总量的 25.9%，累计装机容量已占累计装机总量的 7.3%，在技术能力不足、专业化施工船舶和设备能力不足的情况下，仍然每年保持同比递增 40%以上以至 99.2%的高速增长。2021 年，累计装机容量已突破 2500 万千瓦大关。“十四五”是我国海上风电发展的关键期。未来几年通过机组大型化、大规模开发所形成的规模效应、专业化施工船舶和设备的投用、数字化技术的普及、全生命周期成本的下降，有望培育出一个可以释放巨大经济社会效益的战略性新兴产业——海上风电产业。我国轴承行业可以增加一个新的市场。我国轴承行业的优势企业当然不会成为这一历史进程的旁观者。海上风电机组工况复杂，比陆上风电机组工况更恶劣。我们必须在建立海上风电机组载荷谱的基础上，进行全方位的数字化轴承设计。不能简单地将单机容量较大的陆上风电机组轴承进行物理放大。要研发应用适合海上风电机组特殊工况的轴承材料、热处理方法、机械加工工艺和密封、防腐、润滑方案。

4. 由集中向分散发展

国家鼓励风电就近开发利用，由集中式向分散式发展，我国轴承行业企

业家和专家中的有识之士，几年前就注意到这一点，并开始了相关工作。最近，中国可再生能源学会风能专业委员会秘书长秦海岩发布了一条重要信息：“我们联合 118 个城市与 600 多家风电企业共同发起了‘风电伙伴行动·零碳城市富美乡村’活动。建议在条件较好的地区率先启动‘百县千村万台示范工程’。未来五年，在全国 100 个县，优选 5000 个村，安装 10000 台风电机组，总装机规模达到 5000 万千瓦，为 5000 个村集体带来稳定收益，惠及农村人口 300 万以上。”对我们轴承行业来说，无疑是一个重要的商机，我们要下大功夫，加大分散式风电机组轴承技术研发和市场开拓的力度。

（三）要密切关注各技术类型主机的应用

1. 双馈型、直驱型、半直驱型风力发电机的开发应用

风力发电机技术类型包括双馈型（带齿轮箱）、直驱型（不带齿轮箱）、半直驱型（带齿轮箱）等。前些年，直驱型市场份额快速增长，双馈型市场份额快速下降。目前这种变化趋缓。2021 年市场同比，双馈型下降 3.4 个百分点，直驱型持平，半直驱型增长 3.1 个百分点。我们要密切关注这一涉及对齿轮箱轴承需求量增减的各技术类型的风力发电机新增装机容量的变化。

2. 滑动轴承应用于风电齿轮箱

目前德国威能极公司已开发 8MW 滑动轴承风电齿轮箱，德国美闻达公司已开发出 5MW 及以上滑动轴承风电齿轮箱，德国采埃孚公司已开发出 4-5MW 滑动轴承风电齿轮箱。我国与国外并跑，上海电气与威能极合作开发 5MW 级滑动轴承风电齿轮箱，南高齿开发出 3MW 级滑动轴承风电齿轮箱，太原重工开发出 2MW 级滑动轴承风电齿轮箱。有研究认为，未来滑动轴承将被大量应用到 4MW 及以上大功率风电齿轮箱，这将大量挤占滚动轴承的市场空间。

四、突破关键技术聚焦关键问题

（一）提高风电机组主轴轴承及变桨轴承的刚性和承载能力

近年来，随着风电机组单机容量的不断增大，暴露出包括轴承在内的变桨系统和主轴系统刚性和承载能力不足的问题。

为解决变桨系统刚性和承载能力不足的问题，需要以提高刚性和承载能力为要义，改进变桨系统的整体设计并优化轴承的选型。其中，变桨轴承的选型，以滚子转盘轴承取代四点接触球转盘轴承，已为实际运用证明为一种成功的选择。我国轴承行业的天马、瓦轴、洛轴、新强联、大冶轴、五洲新春和力星积极参与了这项重大技术改进。其中，五洲新春为滚子轴承取代球轴承，研发生产了 200 多万粒特大型滚子。目前，风电变桨轴承以滚子转盘轴承取代球转盘轴承的取代率国际上已达到 30%，我国刚达到 15%。轴承企业正积极配合风电装备企业加快推进这一进程。

主轴系统的问题比较复杂。主轴轴承是风电机组主传动链系统的关键部件，不仅要承受风力载荷，还要承受主轴、齿轮箱的重力载荷，工况复杂。因应风电机组的单机功率、整体结构、工况、制造成本、安装工艺等因素，主轴轴承采用不同配置，主要有：

1. 三点式支承： 主轴轴承采用一个调心滚子轴承，与齿轮箱两边的弹性支承形成三点式支承，应用于低兆瓦级风电机组。

2. 二点式支承： 有调心滚子轴承+调心滚子轴承、单列圆锥滚子轴承+单列圆锥滚子轴承、圆柱滚子轴承+双列圆锥滚子轴承、GARF 轴承+调心滚子轴承四种配置，应用于中等兆瓦级风电机组。从近年来的发展趋势单列圆锥滚子轴承+单列圆锥滚子轴承已成为大兆瓦风电机组的常用配置。

3. 单点式支承： 大多采用大锥角双列圆锥滚子轴承，亦有采用三排圆柱滚子轴承，应用于大兆瓦风电机组。

近年来，大兆瓦风电机组主轴轴承事故频发，初步分析原因是风电机组主轴系统和选用的主轴轴承均存在刚性和承载能力不足的问题，风能业界和

轴承业界正密切配合努力解决这个问题。

如中国华电集团在甘肃两个风电场和湖南一个风电场使用的北京万源制造的 230 台 2 兆瓦电励磁风电机组，主轴系统事故频发，主要是装用的某跨国轴承公司生产的双列圆锥滚子轴承早期损坏，损坏的形式为保持架断裂，轴承抱死。为解决问题，该公司对轴承结构作了多项改进，用改进后的轴承更换 175 台次，仍未解决保持架断裂，轴承抱死的问题。造成了很大的直接经济损失和间接经济损失。在跨国轴承公司陷入困境的情况下，中国华电集团向轴承企业洛阳新强联回转支承有限公司寻求帮助，新强联提供了本公司研发制造的加强型三排圆柱滚子主轴轴承，经一年多试用，中国华电集团跟踪测试，轴承运行平稳，一切数据正常。

如何提高风电机组主轴轴承、变桨轴承刚性和承载能力，我国轴承行业相关单位还需要作深入研究。

(二) 跨越风电齿轮箱轴承和发电机轴承领域的高门槛

严格来说，我国轴承企业还未能跨越风电齿轮箱轴承和风电发电机轴承领域的高门槛。

对国产风电齿轮箱轴承和发电机轴承，风电齿轮箱部件和发电机部件制造企业、风电整机制造企业都不敢用，风电轴承制造企业也不敢干，几乎到了“谈虎色变”的地步。

但是，从产业安全、国家经济安全的层面考虑，这个门槛是必须下决心跨越的。我们要拿出研发高速动车组轴承和地铁车辆轴箱轴承“十年磨一剑”的精神，攻坚克难，实现风电齿轮箱轴承和发电机轴承的自主化。

风电齿轮箱轴承和发电机轴承都要攻下的共性技术：

从逆向设计起步，逐步过渡到正向设计，进行——

1. 不同工况下，齿轮箱轴承和发电机轴承的载荷谱调查分析和构建。

2. 齿轮箱轴承和发电机轴承动力学仿真分析和数字化建模。
3. 各种齿轮箱轴承和发电机轴承的表面完整性设计。

要攻下的个性化技术：

齿轮箱轴承——

1. 制造齿轮箱轴承的抗磨粒磨损的专用钢材和热处理技术的研发和应用。
2. 防止因滚子打滑造成滚子与套圈工作表面损伤的表面改性强化处理技术的应用。
3. 异常白色组织剥落的预防。

发电机轴承——

1. 达到特殊工况下工作的发电机轴承需要达到的精度、性能、寿命和可靠性（特别是温升、极限转速、振动值和摩擦力矩等）。
2. 达到必须的绝缘性能（包括绝缘层的材料、厚度、与基体的结合强度、电容、电阻、击穿电压、工频耐压、环境适应性等）。

(三) 一项需深入研究的重要技术变革——用 42CrMo4 无软带淬火取代 G20CrNi4Mo (A) 渗碳淬火制造风电主轴轴承

风电机组双列圆锥滚子主轴轴承国际国内轴承业界通行的技术路线是用渗碳轴承钢 G20CrNi4Mo (A) 渗碳淬火制造。

我国轴承行业应用的渗碳轴承钢有 6 种：G20CrMo (A)、G20CrNiMo (A)、G20CrNi2Mo (A)、G20CrNi4Mo (A)、G10CrNi3Mo (A)、G20Cr2Mn2Mo (A)。使用最多的二种：一种是 G20CrNi2Mo (A)，用于制造货车轴承，未来国产高速动车组轴箱轴承也用这种渗碳轴承钢制造；另一种是 G20CrNi4Mo (A)，用于制造冶金轧机轴承和风电主轴轴承。

渗碳轴承钢经过渗碳淬火加工，可以获得很高的表层强度硬度和很好的心部组织韧性，非常适合于制造承受重载荷、冲击载荷的铁路轴承和冶金轧

机轴承。但是，渗碳轴承钢价格贵、加工费用高，尤其是需要表面深层渗碳的特大型轧机轴承和风电主轴轴承，需要用适合深层渗碳的 G20CrNi4Mo (A) 制造，这种 G20CrNi4Mo (A) 渗碳轴承钢价格昂贵（价格是高碳铬轴承钢的 3 倍），同时，深层渗碳要在 800℃ 以上高温加热 200 多小时，不仅要耗费大量电能，而且表层易产生有害的粗大碳化物（要费很大的劲才能消除），还会产生不易矫正的变形，而使工件报废，造成很大的损失。

这项从国外引进的技术，一直困扰着我国轴承厂家，一些专家多渠道寻找解决办法。一种办法是外径 $\varnothing 440 \sim \varnothing 800\text{mm}$ 的冶金轧机轴承，用强度、韧性优于 GCr15、GCr15SiMn 的 GCr18Mo，进行下贝氏体淬火，取代 G20CrNi4Mo (A) 渗碳淬火，制造冶金轧机轴承，这项技术改进已取得成功，并推广应用。但双列圆锥滚子风电主轴轴承超出了这个尺寸范围，无法应用这项技术。

我国轴承行业有二家轴承企业用中碳合金钢 42CrMo4（添加 Ni 等微量合金元素，优化合金成份），进行无软带表面淬火和激光表面淬火，取代 G20CrNi4Mo (A) 渗碳淬火，制造双列圆锥滚子风电主轴轴承或配对使用的单列圆锥滚子风电主轴轴承，大大降低了材料费用和加工费用。希望我国轴承行业有关专家和企业密切关注、积极参与这一技术进程，深入研究这一替代是否可以满足风电主轴轴承的工况所要求各项性能（强度、耐磨性、冲击韧性、疲劳寿命等）。深入研究这项技术，如在风电主轴轴承应用成功，可否移植到冶金轧机轴承，这项技术如能在风电主轴轴承和冶金轧机轴承的制造上成功应用，将会产生巨大的经济效益和社会效益。

(四) 抗磨粒磨损的材料和热处理技术

齿轮箱在工作过程中，齿轮磨损产生的微小金属颗粒，在轴承工作表面形成压痕，压痕边缘形成高的应力集中，成为疲劳源，导致剥落，缩短轴承使用寿命。日本 NSK 公司开发的用中碳合金钢碳氮共渗的 STF 和 HTF 钢，通

过严格控制碳氮共渗工艺,使零件表面得到较多的稳定的残余奥氏体(约 30~35%)和大量细小的碳化物、碳氮化物。后者可保证表面的硬度和耐磨性,使压痕不易形成;前者可以降低压痕的边缘效应,阻止疲劳源的形成和扩展,从而大大提高轴承在如风电齿轮箱和汽车变速器这样的在污染润滑工况下的使用寿命。这方面,洛阳轴承研究所已进行了应用于汽车变速器轴承的研发工作,并取得初步成果,我们应将这一研发成果应用于风电齿轮箱轴承。

(五) 齿轮箱轴承黑色氧化膜处理的机理

在高载荷工况下能正常工作的轴承在低载荷工况下容易打滑。风力发电机在低风速时,也就是在低载荷时相对承载能力较大的轴承在低载荷工况时就容易打滑。

典型的容易产生打滑的工作状况是高速且载荷为零或低载荷。中间轴和高速轴通常情况下具有较高的转速。在低载荷情况下,高转速时由于滚动体的惯性作用,比低转速时会产生更多的打滑。

另外一种引起打滑的工况是停机时的刹车尤其是紧急刹车。在风力发电机的整个寿命中,会有大量的停机操作,它们引起的打滑也是非常严重的。除了各种工况会引起打滑,满滚子轴承的滚动体相互接触并且接触点具有相反的运动方向,也意味着滚动体之间的打滑。最常见的齿轮箱设计包括一级行星和两级平行轴传动。在这种设计中,行星架轴承经常采用具有很好刚性的满滚子轴承。另外,小的风电齿轮箱的行星轮轴承也经常使用满滚子轴承,这里需要的是它的高的承载能力。在满滚子轴承中,滚子之间的打滑是不可避免的。

从 2008 年开始 FAG 公司供应的风电齿轮箱用圆柱滚子轴承均采用氧化发黑处理的轴承。氧化发黑处理是指在钢或铸钢表面产生一层黑色的 Fe_2O_3 和 FeO 氧化物的混合物。氧化层的厚度介于 $0.5\text{--}2.0\ \mu\text{m}$ 之间,它对安装时配合

的影响可以忽略不计。使用氧化发黑的主要目的是预防打滑对轴承造成的损伤。轴承的打滑现象来自各种工作状况以及满滚子轴承滚动体之间的相对运动。

为了防止滚子打滑，损伤轴承工作表面，我国国标 GB/T33623-2017《滚动轴承 风力发电机组齿轮箱轴承》规定：“滚子类轴承的套圈及滚动体应进行黑色氧化膜处理”，按 GB/T15519 进行化学转化处理，表面形成 Fe_3O_4 黑色氧化膜。按这种方法处理的轴承外观与 FAG 等跨国轴承一样。有的专家将 FAG 轴承黑色氧化膜进行化学分析，发现化学成分不但有 Fe_3O_4 和 FeO ，还有其他成分，说明 FAG 采用的不是简单的、我们采用的氧化处理（发黑处理）。这个问题应该深入研究，搞清楚跨国轴承公司风电机组齿轮箱轴承的黑色氧化膜处理的机理和工艺。

(六) 深入研究，优选最佳表面淬火工艺

风电轴承中偏航变桨轴承、三排滚子主轴轴承的套圈用 42CrMo4 进行表面淬火，目前行业里应用了几种不同的表面淬火工艺，需深入研究，优选最佳表面淬火工艺。

现在国内外风电轴承产业通行的工艺路线是电磁感应表面淬火。感应器产生的电磁感应在工件内产生涡流而加热，随之喷淋淬火介质进行淬火。这种淬火方法有一大缺陷，即扫描感应加热路径的末端与起点重叠时，会使起点已淬火的部位回火，产生一个软带。在使用时，软带处易受到磨损，导致早期破坏。

为解决这个问题，国际上开发了无软带感应淬火工艺和装备。这种工艺使用的装备有二个加热淬火组件，每个组件由预热感应器、加热感应器和淬火介质喷淋器组成。这二个加热淬火组件绕着要淬火的轴承滚道表面向相反方向移动，扫描要淬火的滚道表面加热淬火。每个组件扫描加热淬火半圈滚

道。在起始区和结束区，二个组件紧靠着加热滚道，且旋转平台带动工件摆动，这样就可以保证在起始区和结束区各个部位，包括二个组件交界处都加热到相同的淬火温度，喷淋淬火后不会产生软带。该工艺和装备已经在新强联回转支承股份有限公司等单位得到应用。

目前我们行业还有一家风电轴承表面热处理采用完全不同工艺路线的企业——北京京冶轴承股份有限公司（京冶轴承）。这家企业应用自己研发的风电轴承激光表面淬火技术（亦称激光相变硬化技术）已有十多年的历史。这项技术被列入国家“863”计划项目，并获国家科技发明二等奖。

这项技术的基本原理是高能量高密度的激光束快速照射要淬火的工件表面，使其要硬化的部位瞬间吸收光能并立即转化为热能，使激光作用区温度急剧上升。此时，冷态基体与加热区之间有很大的温度梯度，一旦停止激光照射，加热区的金属急冷而淬火，产生硬化。据京冶轴承介绍，这种工艺进行的表面淬火，马氏体晶体细，位错密度高，硬度高，耐磨性好，变形小甚至无变形，无须回火，淬火区获得压应力，不易产生裂纹。可根据需要调整硬化层深度，无需冷却介质，无废气废水排放，低碳环保。

(七)加强对风电轴承主要失效形式的对策的研究

有研究表明，在风电轴承多种形式的失效中，最主要的有：偏航变桨轴承的微动磨损，主轴轴承的微点蚀和微动磨损，齿轮箱轴承的异常白色组织剥落，以及电机轴承的电腐蚀。我们要加强对这些失效形式的研究，寻求延缓失效，提高轴承寿命的对策。

这些失效形式的机理——

微动磨损——由滚动体与滚道接触面之间产生微小幅度的相对运动（微动）所引起的复合形式的磨损。

微点蚀——通常发生在混合润滑或边界润滑条件下，因滚动体的滑动或

打滑引起较高的切向剪切应力，使其接触区域发生油膜破裂致使粗糙峰之间直接接触，造成表面极小的材料剥落，形成微点蚀坑。当许多微点蚀坑聚集在一起时，产生呈现灰色的裂纹状态。

异常白色组织剥落——这是近年来出现较多的新的疲劳剥落形式。其产生机理：处于接触面间的润滑剂在高温高压下或受电流（电荷）的放电影响，并受接触金属的催化作用，发生摩擦化学反应分解而产生氢原子或离子，氢原子吸附于接触面并向金属内扩散，在最大剪应力区的微小缺陷处聚集，当氢含量大于某一临界值 H_c 时，最终形成白色组织剥落。

五、结语

经过十几年奋斗，风电轴承行业快速发展起来，取得长足进步，来之不易，但由大到强会更为艰难。从市场角度来看，已经逐步进入中低端竞争激烈、高端难以突破的发展瓶颈期，是轴承行业发展的缩影。我们既要对标世界先进企业找差距，更需立足自身自主创新求进步，既要关注配套主机的发展趋势，更需专注于轴承本身的关键技术难点，以十年磨一剑的韧劲、恒心，厚积薄发，破茧成蝶，完成由大到强的历史使命。

作为机械基础件的轴承产品技术，需要长期积累，形成扎实的工业基础。实现由大到强的战略转变任务十分艰巨，我们要脚踏实地；同时坚定信心，很多被西方封锁的高新技术装备及配套轴承不断取得突破并始终在为国防等重大关键领域提供支撑，就是很好的例证。

中共中央二十大明确提出全面建设社会主义现代化国家的首要任务就是高质量发展。到二〇三五年，我国制造业整体达到世界制造强国阵营中等水平，创新能力大幅提升，重点领域发展取得重大突破，整体竞争力明显增强，优势行业形成全球创新引领能力，全面实现工业化。实现中国轴承强国梦，必须与制造强国战略同步，是建设中国社会主义现代化强国的重要组成部分。

让我们团结一心，踔厉奋发、勇毅前行，共圆轴承强国梦。

【参考文献】

- [1]何加群, 论我国重大技术装备轴承的自主安全可控.轴承, 2022 (1): 12-15
- [2]秦海岩.“十四五”, 大力发展风电正当时[J].风能,2021(11):1.
- [3]中国可再生能源学会风能专业委员会.中国风电产业地图 2021: 152
- [4]何加群, 我国风电产业领跑世界轴承行业怎么办.轴承工业,2022(2):4-10.
- [5]何加群, 精准发力关注和解决行业存在的科技“真”问题.轴承工业,2022(4):6-9.
- [6]中国可再生能源学会风能专业委员会.2021 年中国风电吊装容量统计简报[R].2022.
- [7]周宏春, 发挥海洋碳汇在碳中和目标实现中的巨大作用.宏春观察 2022.9.17
- [8]朱才朝, 周少华, 张亚宾, 谭建军.滑动轴承在风电齿轮箱中的应用现状与发展趋势[J].风能, 2021 (9): 38-42.
- [9]王建梅,罗永成.兆瓦级风电机组主轴承选型及发展趋势[J].轴承工业,2021(6):24-26.
- [10]候俊.风力涡轮机新的高性能主轴承解决方案[J].轴承工业,2021(1):23-26.
- [11]程涛,刘际轩,周国,张建昌.海上风电主轴用轴承技术[J].轴承工业,2021(2):22-27.
- [12]候俊.通过改良变桨轴承延长风力涡轮机寿命[J].轴承工,2021(3):33-36.