

打开“最后的黑匣子”，国产主轴轴承投运近4年表现超预期

风机主轴轴承国产化替代跑出“加速度”

■ 本报记者 李丽曼

“乐陵风电场自2020年正式投运以来，使用国产主轴轴承的风电机组零失效，运行温度、油脂铁含量、CMS振动监控等核心运行指标均优于行业平均水平，尤其是温度始终维持在40摄氏度左右，远低于临界温度65摄氏度，表现稳定可靠。”国华投资山东分公司乐陵风电场场车庆华告诉《中国能源报》记者。

作为风电设备中的关键部件，主轴轴承的研发和生产对精度控制、载荷能力、运行寿命等指标有极高的要求，多年来被视为风电国产化进程中的“最后一环”。在风电行业降本增效的大背景下，我国风电主机厂商逐步突破技术壁垒，打开了风电设备国产化“最后的黑匣子”。华北平原之上的乐陵风电场，即使在强湍流、高剪切等复杂风况的持续冲击下，安装着国产主轴轴承的风电机组运行表现依旧超出行业平均水平，交出了亮眼的答卷。

■ 稳定运行数年 国产主轴轴承表现突出

乐陵风电场是典型的平原风电场，数十台风电机组分布在大片玉米地里。来自渤海湾的洋流与华北平原的风在此交汇，虽然年平均风速仅有4.96米/秒，但瞬时风速高，风向多变，时常发生高湍流、极限风等复杂气象，风轮不平衡载荷大，主轴轴承负荷工况苛刻。让风电场工作人员感到欣喜的是，自2020年全容量并网以来，乐陵风电场平均年发电小时数可达2500小时，已累计发出9.2亿度绿电，每年所发电量大约可满足15万居民一年的家庭用电需求。

“2021年全国风电场生产运行指标对标华北地区山东省级AAA级”风电场、“2022年全国无故障风电场管理成果”奖、“2023年两百日无故障风电场和2023年无故障风电场管理先进成果”管理成果——凭借超预期的发电量和高可靠性表现，乐陵风电场近年来斩获了诸多“明星头衔”。

优异运行表现的背后，离不开以国产主轴轴承为代表的核心部件的强力支撑：现场34台单机容量为3.0兆瓦的远景能源风电机组，均采用了远景自研主轴轴承。

“主轴轴承是风机所有运动部件的枢纽，也是风电机组的核心部件，机械设备是否运行得好，温度是首要判断指标。”车庆华说，“如果机械设备润滑到位，基本没有什么磨损，就不会出现温度过高的情况。风电主轴轴承的行业标准为不超过65摄氏度，而运行近4年来，远景主轴承

运行温度始终远低于此，基本维持在40摄氏度左右。”

除了温度以外，现场监控数据显示，该风电场国产主轴轴承磨损极低油脂铁含量也明显优于行业平均水平；基于CMS振动监测数据和伽利略平台大数据的实时计算评估，所有自研主轴轴承的特征信号均在正常范围以内，健康度同样保持良好。

“一方面，国产主轴轴承在性能上已经达到或接近国际先进水平，能够满足风电设备对主轴轴承的高要求；另一方面，国产主轴轴承的性价比优势也使得风电项目的整体成本得到有效控制。此外，国内轴承制造企业售后服务、响应速度、数据开放和技术支持方面表现更为出色，为风电设备的稳定运行提供了有力保障。”车庆华称。

■ 打开“黑匣子” 助力风电持续降本增效

“2019年前，我国风电主轴轴承被进口品牌垄断，国外品牌市占率基本达到100%。”远景能源主轴轴承专家在接受《中国能源报》记者采访时坦言，“主轴轴承需要满足高精度控制、高载荷能力、长寿命等诸多技术要求，研发和生产难度极大，新进入者技术壁垒很高，如今国产主轴轴承的突破实属来之不易。”

从产品本身来看，远景自研主轴轴承采用纯净的特种优质钢材，特殊的冶炼方式可以有效控制有害非金属夹杂物水平，提高轴承的抗疲劳能力，同时借助热处理方式创新，得到极具韧性的组织性能，提高轴承的抗冲击能力，也使得轴承滚动道的抗磨损能力得到大幅提升。此外，与同类型进口产品相比，自研主轴轴承产品加工精度提高，使得承载运转更为平稳，内部滚动表面更为光滑，轴承摩擦发热水平更低，有效控制了产品内部缺陷，极大提高了轴承的可靠性。

除了技术层面的突破，国内轴承生产商还独辟蹊径，借助定制化优势打开更大市场空间。

“相对于传统轴承制造商，远景作为整机制造商，可以将轴承放在本土化环境中研究，开发出最适合中国应用场景的轴承，比如根据风况特点定制化设计内部接触，再根据摩擦磨损特征定制化控制策略，过滤不利的弯矩载荷波动，助力发电机获得更高的输入扭矩，从而提升风机发电量。借助远景伽利略系统，还可以预知风险，针对每台风机进行差异化运维，或者主



图为国华投资山东分公司乐陵风电场。远景能源/供图



图为国产风机主轴轴承。远景能源/供图

动运维规避故障，带来更高的发电效率。”该轴承专家进一步表示。

“以往，进口主轴轴承产品一旦失效，海外供应商可能需要大几周时间作出反馈、几个月时间更换维修，时间、人力成本太高，国产主轴轴承实现替代后，运维响应时间明显更快，一天就可以找到所需备件，尽可能减少停机时间，同时各类数据更加开放透明，‘黑匣子’全部打开，即使出质保后风电场运维成本也降低了不少，还提高了发电收益。”车庆华感慨道。

■ 自研创新不断 提升中国风电竞争力

起步虽晚，但厚积薄发。风电设备国产化“最后的黑匣子”已打开，风电上下游产业链正迎来更高频“共振”。

远景能源工程服务与资产管理中心大现场五区副总经理刘飞告诉记者，在国产核心部件逐步替代、可靠性不断提高的情况下，风电场运维工作正不断精简，效率也明显提高。“我从事风电运维工作近十年，感受非常明显。一座装机容量10万千瓦的风电场，运维人员数量已经从十三四个减少到现在的七八个，很快三四个人就能够满足运维工作需要。2022年以来，随着自研部件的切入和智能化水平的提升，风机可靠性提升，远景开始推行风电场集群化管理，现场项目经理人员精简超过50%。”

车庆华指出，目前各大央企主轴轴承采购环节国产比例正稳步提升，对进口轴承的依赖不断下降，随着国内轴承制造技术进步和产品质量提高，国产主轴轴承的市场占比还会进一步上扬。

从无到有，由少到多，国产主轴轴承的潜

力还在不断释放。自2019年首台自研主轴轴承成功应用至今，远景已累计开发出14款自研主轴轴承，累计交付近6000台，应用于全球508个风电项目，涵盖2—16兆瓦风机容量，覆盖海陆、平原、山地、沙戈荒、高极限风、超低温等各类场景。其中超过1500台配备自研主轴轴承的风机在海外市场交付，自批量投运以来零失效。

有预测认为，今年国内风机主轴轴承国产化比例有望从2021年前的10%左右，提高到65%左右。

在海外市场，国产风电设备的竞争力也日渐凸显。据前述远景能源主轴轴承专家透露，目前远景自研主轴轴承已经通过国际权威认证机构DNV-GL设计审核和制造审核，成功获得IECRE证书，在海外市场打破了外资品牌的垄断，凭借高可靠性、零失效的特点，成功跻身全球一流主轴轴承品牌。

全球风能理事会预测，未来10年，全球风电装机量有望新增1太瓦以上，而西方风电产业链却饱受通货膨胀、原材料价格上涨、地缘政治以及风机产品质量不佳等问题困扰。中国制造的风电设备产品供应将大幅缓解供应链危机，为全球绿色转型贡献中国力量。

以“电力”助力“算力”



海底数据中心首舱下水，海南电网公司陵水供电局出动保电人员15人次，应急发电车1台，全力保障下水仪式可靠供电。海南云公司/供图

■ 郭卫华 刘茜茜

位于海南省陵水黎族自治县英州镇的热带海湾，是一片拥有碧海蓝天与四季暖阳的热带海湾。在波光粼粼的海面下，单个罐体重达1300吨的海底数据舱隐身于35米深的海床上，安静地运转着。

这是全球首个商用海底数据中心项目——海南云海底数据中心，拥有全球最大的海底数据舱，是海南自贸港数字化建设的“新基建”创新示范工程。为了满足该数据中心对于供电系统的安全、可靠性需求，海南电网公司量身定制供电方案，开辟业扩报装“绿色通道”，以“电力”助力“算力”，服务海南数字经济高质量发展。

■ 定制化供电 服务海南自贸港“算力”加速

海南云海底数据中心项目被纳入《海南省海洋经济发展“十四五”规划（2021—2025）》，2022年开始建设，计划2025年建设

完成。“陆数海算”率先落子海南，既是“双碳”背景下的一场双向奔赴，也是海南自贸港“向海图强”“向数图强”的生动实践。

作为数据、内容和算力的承载平台，大数据中心对供电可靠性的要求高达99.9999%。早在2022年初项目落户陵水后，海南电网公司第一时间组织技术专家及业务骨干多次现场勘察，根据数据中心建设规模、中长期规划、设备容量、负荷水平及各阶段的用电需求等，开辟了业扩报装“绿色通道”，量身定制了“双电源”标准的供电方案，全面保障项目早日用上安全电、放心电。

“我们提前介入项目，服务关口前移，与客户建立‘一对一’对接服务机制。”海南电网公司陵水供电局负责人说，通过专属客户经理跟踪服务现场勘查、供电方案答复、设计文件受理等各个环节，最终协助客户制定了28000千伏安负荷专属供电方案，最大化精简了业务办理时间。

为保障海底数据中心项目用电，海南电网公司采用110千伏万福站专线主供、110千伏鹤仔变电站10千伏珊瑚宫殿线备供的双

电源供电方式，岸站基地报装500千伏安、1000千伏安、2500千伏安变压器各2台，海底报装500千伏安变压器共计40台，既满足了项目用电负荷需求，又减少了输电线路建设和工程成本，为项目建设用电提供“双保险”。

■ 把数据存进海底 每年节省电量1.22亿千瓦时

在全球能源转型和中国“双碳”目标背景下，海南云海底数据中心省电、省水、省地的独特价值特征，为海南岛信息基础设施可持续发展提供了新的方案，把数据存进海底，把海洋能源转化为海洋算力，广袤海洋将成为数据中心的新坐标。绿色发展将成为数据中心的大势。

沉入海底的数据舱并非就此成为“孤岛”，它与岸站、水下分电站和海底光电复合缆共同组成了海底数据中心。海底光电复合缆联通其余3部分，将电力和网络分配到每一个独立的海底数据舱。可以说，“电力”就是“算力”的血液循环系统。

通常来说，陆地数据中心的服务器在运行过程中会散发大量热能，必须通过一套复杂的制冷系统使机房服务器维持在特定的温度范围，需要消耗大量电能运转空调进行热量传递，并通过淡水蒸发消散热量。海南云海底数据中心海南示范开发项目总经理蒲定介绍说：“海洋作为全球最大的自然冷源，将数据中心建在海底，其优势在于减少在制冷上所需的电力消耗，在几乎不消耗淡水资源的同时，可以支持更高的功率密度，并稳定地提供澎湃算力。”

海南电网公司陵水供电局负责人表示，海南云海底数据中心建设完成后，将形成海南算力“底座”。以100个海底数据舱为例，相较于同等规模的陆地传统数据中心，每年能节省用电量1.22亿千瓦时，大幅减少对电网高峰负荷的压力。

本报讯 近日，重庆市遭遇连续高温晴热天气，局部地区最高温度达44摄氏度，用电负荷快速攀升。为提升迎峰度夏电力保供能力，8月24日，重庆首次开展大规模多场景车网互动应用。

据了解，V2G技术是指新能源汽车给电网送电的技术。V2G充电桩能给新能源汽车充电，也能承载新能源汽车反向放电，使新能源汽车变身一个巨型“充电宝”。新能源汽车车主通过V2G充电桩向电网放电，可获得相应的经济收益，并有助于削减电网高峰负荷。

8月24日晚上8时，共有120辆新能源汽车在85个V2G站点（120个桩）参与V2G规模化反向放电试点应用，涵盖公交、公共场站和办公场所等场景。放电共持续2个小时，累计向电网反向放电1700余千瓦时，可满足超420户居民用户1小时的用电需求。

此外，为应对夏季用电高峰，国网重庆电力利用谷段电价政策，引导新能源汽车用户在谷段充电，助力电网错峰。8月24日晚，重庆市共有7.56万辆新能源汽车集中在电网负荷谷段时期参与错峰充电，为用电高峰时段最大让出超26万千瓦负荷。同时，还有88个充电桩通过虚拟电厂模式参与电网削峰，共降低电网高峰负荷近1万千瓦。

“这次大规模车网互动应用，不仅有助于本轮高温削减电网高峰负荷，助力电网安全迎峰度夏，同时也验证了新能源汽车与电网融合互动的成效，为今后我市开展更大规模车网互动奠定了基础，进一步推动我市车网互动规范化、市场化、常态化、规模化发展，更好助力重庆超便捷城市建设和国家车网互动示范城市申报。”国网重庆电力营销部市场处负责人王松表示。

(冯胜岚 唐红艳 秦晓东)



8月24日，在重庆市江北区V2G规模化反向放电试点应用现场，新能源汽车正向电网送电。冯胜岚/摄

重庆首次开展 大规模多场景车网互动应用