

国内首台深远海浮式风电装备“扶摇号”总装下海，机位点平均水深达65米

风电开发挺进深远海

■本报记者 李丽曼



技术百花齐放

近日，国内首台深远海浮式风电装备“扶摇号”在广东茂名广港码头完成总装，举行了拖航仪式，前往平均水深达65米的广东湛江罗斗沙海域进行示范应用。浮式海上风电装备让深远海丰富的风力资源不再遥不可及，海上风电的可开发范围正在不断拓宽。

跨入新阶段

“扶摇号”是我国目前最大的浮式风电机组，由中国海装牵头自主研发，该浮体平台总长72米，配备了功率为6.2兆瓦的抗台风性风力发电机组，机位点平均水深达65米，超过了传统固定式海上风电的水深极限。

“与传统陆上风电或近海风电开发相比，深海风资源开发面临水位太深的现实挑战，如果采用先打桩再安装风电机组的方式，不仅施工成本高昂，而且桩基太长影响风机稳定性。”中国海装学科带头人董晔弘在接受记者采访时表示，“在开发深远海风电的时候，需要考虑将风电机组安装在漂浮的平台上，也就是海上浮式风电技术。”

据董晔弘介绍：“研制过程中，面临周期紧、环境条件流速大、海底地质条件复杂等诸多难题，中国海装项目团队先后攻克突破了复杂海洋环境气动及水动载荷耦合动力学分析技术、海上浮式风电装备协同控制技术、浮式风电装备全耦合水池模型试验技术、基于系统性能匹配的海上浮式风电装备总体设计技术、以传动链优化为核心的海上浮式风电机组适应性设计技术等系列卡脖子难题，最终研制出了具有自主知识产权的深远海浮式风电装备‘扶摇号’。”

“关键核心技术买不来，更要不来，唯有依靠自主创新和自主研发。”董晔弘进一步告诉记者，“在开发过程中，中船集团下属的船舶设计研究中心和中国船舶科学研究中心承担了浮体设计、锚泊系统设计、水池试验等方面的研究任务，上海交大船舶海洋与建筑工程学院为高精度的缩比水池试验提供了重要的技术支撑。此外，哈尔滨工程大学承担了一体化耦合仿真相关的机理和理论研究工作，重庆大学承担了浮式风电机组传动链力学分析及受力状态监测等技术研究。在各单位的合作下，最终完成了浮式风电

装备的机组-浮体-系泊总体设计技术、一体化仿真分析技术、水池缩比试验验证技术、风电机组适应性优化技术及海上浮式风电建造施工技术等全流程技术开发，具备了从气象环境资源数据出发，开展浮式风电装备研制的正向设计及实施能力。”

根据国家气候中心统计的数据，我国深海风资源总量可达到10亿千瓦，相当于近海风资源的2倍，正值我国海上风电产业逐步进入全面平价时代，浮式风电市场也迎来了百花齐放。

实际上，除了中国海装外，巨大的市场潜

力已吸引了大量企业入局。不论是明阳智能等本土主流整机企业，还是西门子歌美飒、通用电气等国际整机制造商，都相继发布了新的浮式海上风机技术。去年7月，通用电气宣布将研发单机功率为12兆瓦的浮式海上风机，维斯塔斯也宣布旗下10兆瓦浮式风机进入商用阶段。业界普遍认为，在全球积极应对气候变化的背景下，浮式海上风电这一赛道将变得更加热闹。董晔弘认为：“这是非常好的趋势，中国的浮式风电技术在短短的三四年间走过了欧洲将近20年的路。”

拓展开发边界

风电是实现碳中和的重要路径，不断推陈出新的浮式海上风电技术，正在持续扩展我国海上风电的可开发范围。从潮间带到近海，从近海到深远海，我国海上风力资源的可开发“边界”已愈加模糊，浮式海上风电技术的应用势必将推动海上风电市场规模实现高速增长。

全球风能理事会发布的数据显示，近两年来，我国都是全球海上风电新增装机容量最多的国家，随着我国海上风电产业正式步入平价时

代，中国仍将是全球海上风电市场的“绝对主力”。据英国第三方咨询机构Carbon Trust此前发布的预测数据，中国的浮式风电市场到2030年将达到49.5万千瓦，在2035年将达到250万千瓦，到2040年则有望达到700万千瓦。

董晔弘表示，从目前来看，福建、粤东、粤西及海南周边海域风资源储量高，靠近负荷中心、开发潜力大，很有可能是下一阶段海上风电开发的热点区域。在这些海域，中高水深的区域大量存在，浮式风电市

科技前沿

研发6年成“悟空” 核电检修显神通

本报讯 近日，由“工人院士”、中广核运营公司发电机检修主任工程师王建涛带领团队自主研发的发电机不抽转子检修机器人在宁德核电大修现场首次正式应用，完成了以往需要抽转子才能完成的检修项目，检查数据合格。此次机器人的成功应用，为核电发电机检修在安全性和效率提升上打开了全新局面。

核电站发电机每隔5年~6年需抽出转子，以便对定子及转子内部进行全面检修和试验。鉴于这项工作耗时长、风险高，王建涛和团队萌生了“在不抽转子的前提下借助机器人完成检修和试验”的想法。

2018年，“发电机不抽转子检修机器人科研项目”正式立项实施，王建涛为机器人取了一个昵称——“悟空”，希望它能像孙悟空钻进铁扇公主肚子里一样，无往不利解决难题。

最初，我们想将国外的成熟技术应用在自己的设备上，可光做可行性评估就要花费50万元。如果能用，租设备就更贵；不能用，就等于50万元打了水漂。”在跟国外专家反复沟通后，自主研发成了王建涛团队唯一的选择。

在2021年宁德核电站2号机组第5次大修期间，当时的“悟空1.0”版本首次进入了发电机内部。历经短短1天的测试，原本信心满满的王建涛发现了不少问题。经过梳理，他记录了上百条改进意见，很多原来的设想甚至要重新调整。

研发团队明白，创新不是想当然，发现问题才是改进的第一步。之后的1年多，机器人大改了3次，原本的导轨式安装变成了磁吸式，完全舍弃了换槽装置后，机器人进入发电机变得更加简单。机器人组合不合理，那就缩小本体体积，组合拥有不同功能的机器人，让“悟空”可以“72变”。

“光磁吸材料就试验了5种，为了找出最优的功能组合，我们需要了解最新的技术，机器人换代快，最夸张的时候，一批几十个机器人全都推翻重来。”王建涛说。

今年5月，在宁德核电支持下，“悟空3.0”正式上场。5月21日凌晨，N305大修发电机不抽转子机器人检修开始，改进后的“悟空3.0”更加轻薄小巧，它沿着定转子环形气隙缓缓进入发电机内部，按照指令一圈一圈查看发电机内部情况，并通过传感器实时传输画面和数据。在完成一系列检修项目和试验后，机器人功能实现设计预期，研发团队6年的努力终于结出了硕果。

目前，机器人已申请国家专利28项，其中有6项功能是国外机器人不具备的，填补了发电机检修的国际空白。据悉，结合各核电基地机组的差异，“悟空”未来将“钻进”更多机型发电机“肚子”中，预计5年左右一次的抽转子工作将推至10年，甚至更久。

(石海萍)

江苏盐城：滩涂“风补渔” 综合效益高



图片新闻

在江苏省盐城市，新能源得到广泛开发利用，沿海滩涂风力发电、光伏发电、生态养殖等立体高效综合开发生态效益显现。图为盐城市大丰区沿海滩涂“风补渔”产业基地。
人民图片

具备多种优势 发展前景广阔

海上光伏迈向“深蓝”

■本报记者 董梓童

近日，山东省青岛市印发《关于激发市场主体活力稳定经济增长若干政策措施的通知》及解读，明确提出按照市场化方式，吸引更多社会资本支持海上光伏和海上风电开发建设。2025年底前建成的漂浮式海上光伏项目，优先参与分布式发电市场化交易。根据规划，今年内山东将开工上百万千瓦的海上光伏项目。

自然资源部国家海洋技术中心海洋能发展中心副主任崔琳指出，海上光伏作为一种新的能源利用方式和资源开发模式，具有发电量高、土地占用少、易与其它产业相结合等特点，有利于优化能源消费结构，逐渐成为能源投资者争相参与的热点项目。今年以来，山东、浙江等省先后出台支持文件，推动海上光伏规模化发展。

项目逐步落地

中国光伏行业协会助理秘书长江华指出，随着陆上光伏面临土地资源紧张的问题，光伏发电应用场景也愈发多样化，海上光伏成为行业发展的新方向。今年以来，浙江、福建、河北等省份就海上光伏进行了相关探索与储备。

“我国大陆海岸线长1.8万公里，按照理论研究，可安装海上光伏的海域面积

约为71万平方公里。以千分之一的安装比例估算，海上光伏装机规模可超过7000万千瓦。水上光伏技术已在湖泊、水库等多种场景下应用，在发电量、安全性等方面得到认可，适用于海洋环境的光伏技术正在取得突破，海上光伏电站的建设具备技术可行性。”崔琳认为，不管从资源储量还是技术发展的角度出发，海上光伏规模化开发潜力巨大，商业化前景广阔。

山东先行先试。5月中旬，山东省能源局桩基固定式海上光伏项目竞争配置工作正式开启，共确定了10个场址，涉及滨州、东营、潍坊、烟台、威海、青岛等市临近海域，预计装机规模约1125万千瓦，今年计划开工300万千瓦以上。

国家海洋技术中心的数据显示，截至今年5月底，我国确权的海上光伏用海项目共28个，其中江苏18个、山东4个、浙江3个、辽宁2个、广东1个，累计确权面积达1658.33公顷。

多措并举护航

近期，华润电力东营鲁辰10万千瓦海上光伏试点项目开工；金能科技表示沐岛渔光互补海上光伏发电项目已取得相关备案和一期项目的海域使用权证书，力争今年8月具备开工条件。不过由于海

上光伏产业发展未形成规模，且项目总体投资量大，引发二级市场投资者对相关项目投资收益的担忧。

国际可再生能源机构测算，海上光伏电站的建设成本比陆上光伏电站要高出5%~12%左右，预计随着商业模式不断成熟，发电成本将会持续降低，项目将能够实现收益。金能科技董秘称，根据可研报告，上述项目投资财务内部收益率为7.6%，投资回收期为11.63年，具有较好的盈利能力及偿债能力。

值得注意的是，为推动光伏走向“深蓝”，山东省能源局还出台了一系列扶持和保障措施。山东省能源局副局长、二级巡视员邓召军在新闻发布会上表示，对2022年至2025年建成并网的“十四五”漂浮式海上光伏项目，省财政分别按照每千瓦1000元、800元、600元、400元的标准给予补贴，补贴规模分别不超过10万千瓦、20万千瓦、30万千瓦、40万千瓦。同时，参照海上风电支持政策，在配置储能设施、回购送出线路等方面给予支持，推动漂浮式海上光伏走上规模化、商业化开发道路。

产品需迭代升级

江华认为，未来海上光伏产业有望成

为可再生能源装机的重要组成部分。不过，由于光伏项目安装环境从陆上变为海上，存在烟雾与高湿、海风与海浪、恶劣气象条件以及海洋灾害等风险，海上光伏面临着施工、运维等多方面挑战。

中交上海航道勘察设计研究院有限公司港航所副所长张虎平认为，光伏电站安装环境的变化，要求企业根据项目地具体情况进行精细化设计。与内河光伏项目不同，海上光伏要考虑到风浪大和冰荷载的问题，需充分考虑海上基础施工需求，搭建消浪设施。

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司新能源工程院土建所所长田伟辉表示，海上光伏设计条件复杂，设计方案受环境条件影响大，还需要考虑高支架运维、设备防腐等需求。为此，该公司提出了“平行索柔性光伏支架+桩”等方案，以提高海上光伏的施工效率。

东方日升新能源股份有限公司研发主任工程师刘宝信指出，海上光伏电站选型对组件的材料、结构、系统稳定性等提出了更高要求，业内企业正聚焦沿海光伏组件易腐蚀等痛点，进行产品升级。“比如高密度封装技术、电泳膜边框等都可以提升组件的抗侵蚀能力，以及极端环境下组件的安全性。”