国际标准刊号：ISSN 1674-9219
国内统一刊号：CN11-5942/TK
03
2021年 总第133期 赛迪出版物

风能
WIND ENERGY

传播专业知识　　启迪成长智慧

中国可再生能源学会风能专业委员会
《中国核心期刊（遴选）数据库》收录期刊　中国知网收录期刊

P12. 专栏
新型电力系统需要“新”在何处？

P44. 海上风电
“日不落帝国”的海上风电新野望

P26

海上风电 世界级实验平台投运了

位于广东阳江的国家海上风电装备质量监督检验中心，是国内唯一国家级海上风电装备公共技术研发实验平台，也是迄今为止全球最大的叶片检测实验室。它可以开展150米级叶片全尺寸试验，表明中国风电叶片共性技术探索进入了“无人区”。

ISSN 1674-9219
03

GOLDWIND
金风科技
DRIVING OUR RENEWABLE FUTURE
可持续 更美好
www.goldwind.com.cn

广告

传承高铁荣耀
和聚风电智慧

风力发电机组 | 智慧运维服务 | 综合能源服务 | 资源开发服务

中车株洲电力机车研究所有限公司
CRRC ZHUZHOU INSTITUTE CO., LTD.

中国中车 CRRC

广告

广告

40余年的坚守
只为绿色能源点亮生活

绿色创想，驱动未来

矢志不渝，永在追风路上

风电拓荒者

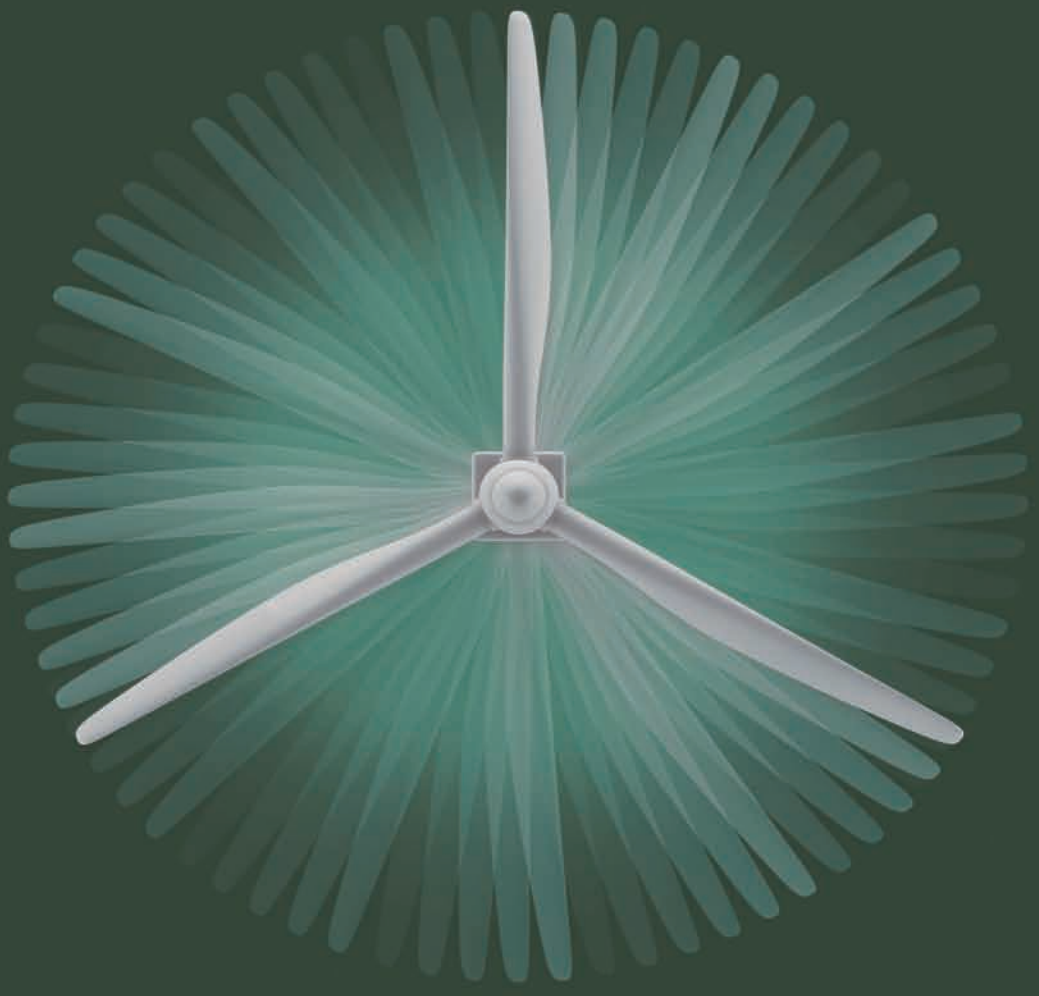
深请中国风电资源，始终坚持创新驱动

运达股份 WINDEY

浙江运达风电股份有限公司
地址：浙江省杭州市文二路391号
西湖国际科技大厦A座18F
电话：0571-87397666
网址：www.chinawindey.com

广告

MEGAP&C®



麦加芯彩让生活更环保

MEGA P&C Makes Our Life Greener and Better

麦加芯彩
新材料科技(上海)股份有限公司
MEGA P&C Advanced Materials (Shanghai) Co., Ltd.

如需了解更多我们的解决方案，请联系：电话：+86 21 59100888 邮箱：zhanghuayong@megacoatings.com 网址：www.megacoatings.com

广告

面对极端天气频发，更需坚定发展可再生能源的决心

文 | 秦海岩

3 月 14—16 日，一场席卷我国的沙尘暴拉响了生态环境问题的警报。此次沙尘天气强度为近 10 年来最强，影响到 40% 的国土面积，黄沙遮天蔽日，宛若世界末日，多地空气质量达到严重污染级别。今年第一季度就出现过 6 次沙尘天气，为近 10 年来同期最多。这再次提醒我们，沙尘暴只是迟到，而不是缺席。在全球范围内，近年来极端天气也愈演愈烈。2019 年至 2020 年，澳大利亚、美国多地爆发的森林大火和山火肆虐几个月之久，上万人流离失所，数亿只动物遭遇灭顶之灾，由此产生的浓雾蔓延至南美以及欧洲地区；北极圈史无前例地出现 38℃高温，海冰覆盖面积连创新低，对当地动植物的生存和全球气候构成巨大威胁；中国、日本、印度等地接连遭遇洪水袭击，仅中国就有 7000 多万人次受灾，直接经济损失超过 2000 亿元……与此同时，空气污染、垃圾围城等问题同样日渐加剧，以至于联合国秘书长古特雷斯不得不发出警告，气候破坏即将到达不可逆转的地步。

面对自然界以最残酷方式发出的警告，各国意识到应对气候变化到了刻不容缓的地步，通过加速能源转型构建绿色、可持续的经济形态成为全球共识。越来越多的国家和地区开始制定雄心勃勃的气候目标，已有近 30 个国家和地区确定了建设“零碳社会”的时间表。芬兰、奥地利、冰岛、瑞典等宣布在 2035—2045 年实现零碳；多个欧盟成员国、英国等提出在 2050 年实现零碳。2020 年 9 月，中国国家主席习近平在联合国大会上郑重宣布，中国的二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。这是中国首次向全球公布实现碳中和的时间点，也是迄今为止各国中做出的最大减少全球变暖预期的气候承诺，充分彰显了中国在全球性事务中的大国担当。

风电和太阳能光伏发电作为清洁可靠且成本快速下降的非化石能源发电技术，是实现碳中和目标的主力军。经过多年的培育，风电产业已经成熟。过去的 10 年，我国陆上风电度电成本下降了 40% 左右，与传统化石能源发电成本基本持平甚至更具市场竞争力。风电的大规模应用不仅会降低全社会用能成本，还可以减少碳排放，增加就业，拉动 GDP 增长，带动产业结构升级，经济社会效益显著。因此，发展可再生能源是应对气候变化、落实碳中和目标的关键路径，更是实现低碳、绿色、可持续发展的重要支柱。

为实现“双碳”目标，可再生能源开发需要进一步提速。全球能源互联网发展合作组织的最新研究显示，综合考虑能源转型需要、经济社会发展、产业结构调整等因素，到 2030 年我国风、光累计装机容量不能低于 18 亿千瓦。而截至 2020 年，我国风、光累计并网装机容量只有 5.3 亿千瓦。由此可见，可再生能源并非发展过多，而是还远远不够。为此，应当从国家战略到产业政策，从市场规则到企业自觉，全方位加快推进能源转型，使风、光早日成为主力电源，打造清洁低碳、安全高效的电力系统。

应对气候变化，是当前人类面临的最紧迫任务之一。日益频发的极端天气警示我们，全社会必须站在命运共同体的高度认清发展可再生能源的重大战略意义，更加坚定非化石能源的发展方向，推动人与自然的和谐共生。

26 封面故事 Cover Story

海上风电世界级实验平台投运了

位于广东阳江的国家海上风电装备质量监督检验中心，是国内唯一国家级海上风电装备公共技术研发实验平台，也是迄今为止全球最大的叶片检测实验室。它可以开展150米级叶片全尺寸试验，表明中国风电叶片共性技术探索进入了“无人区”。

12 专栏 Column

新型电力系统需要“新”在何处？

在我国，可再生能源对传统化石能源电力的替代到了何种程度？以新能源为主体的新型电力系统，需要“新”在何处？本期专栏重点讨论这些问题。

22 对话 Dialogue

平价时代，深挖潜能算好账

龙源电力集团股份有限公司党委副书记、总经理唐坚认为，应深挖风电场的潜能，算好经济账，加强存量市场的运营管理，全方位提高风电场开发水平。

48 国际 International

得克萨斯州大面积停电让谁颤抖

悲剧发生后，无论是政府、企业，还是媒体，都需专注于建立更为经济、公平的弹性电力系统，并通过进一步完善管理模式来确保能源供应安全。

能源新说

新能源产业正迎来规模爆发期，而我国建设用地指标长期稀缺，在兼顾各行业用地需求时，地方政府可根据实际情况，加强统筹协调。此外，在用地审批时，应考虑适当简化流程，切实减轻企业负担。

——中国地矿经济学会法学分会常务理事 吴永高

Nidec
All for dreams

SSB Wind Systems
Be consistent.

SSB变桨系统
经验祝您成功

拥有近30年风电领域的经验，在全球范围内超过33000台风机使用变桨系统，其中在中国累计超过8000台风机上安装使用。

集成式变桨驱动器EPD

SSB超级电容模组

手持高压版电池电容测试仪BPMM-2H

叶片状态及全风域测量系统
Blade Vision

埃斯倍风电科技（青岛）有限公司　www.ssbwindsystems.cn

山东省青岛市崂山区株洲路91号 266101　TEL: +86 532 88702788

数据来源：埃斯倍风电

广告

目录 CONTENTS

《风能》杂志在线阅读网站
www.cwea.org.cn

卷首语/ From The Editor

01 面对极端天气频发，更需坚定发展可再生能源的决心 / 秦海岩

08 **风向/ Direction**

专栏/ Column

12 新型电力系统需要“新”在何处? / 张树伟

乘风/ Promotion

16 当小镇有了风电 / 赵福艳，陈远灿

现场/ Presence

20 分秒必争，当好机组“医生” / 张晓雷

对话/ Dialogue

22 平价时代，深挖潜能算好账

封面故事/ Cover Story

26 海上风电世界级实验平台投运了 / 薛辰

公司/ Company

32 锐电科技：将老旧机组年利用小时数提至3000小时 / 王芳

调研/ Survey

36 2020年欧洲新增风电装机14.7GW / 夏云峰

海上风电/ Offshore Wind Power

44 “日不落帝国”的海上风电新野望 / 顾晓明

国际/ International

48 得克萨斯州大面积停电让谁颤抖 / 孙一琳

公开课/ Open Class

50 依托行业大赛加快风电技能型人才培养的实践与思考 / 李良君，何昌国，王华君

技术/ Technology

56 浅谈风电平价大基地项目机组定制化开发模式 / 刘鑫

60 塔架定制化设计中的载荷优化方法探讨 / 蔡继峰，杨维佳，朱瑾

66 定制化浪潮下风电机组设计关键技术分析 / 胥昂

70 基于资源评估的在役风电场增功提效方案制定探究 / 薛浩宁，王海斌，马剑辉，刘斌

74 平价时代风电项目投资特点与趋势 / 徐燕鹏

广告索引

封二	金风科技
扉页 1	中国中车
扉页 2	中国海装
扉页 3	运达股份
卷首语对页	麦加芯彩
目录对页 1	埃斯倍
目录对页 2	歌美飒
版权对页	维谛技术
P15	东方电气
P25	鉴衡认证
P35	《风能》杂志
P47	威能极
P53	联合动力
P59	上海电气
P65	南高齿
P79	恩斯克
后彩一	CWP2021
封三	重齿
封底	罗特艾德

想象如何将未来变成现实，将风能带往下一个时代。我们知道这需要：
先进技术、坚实的业绩、精益求精以及对我们所从事的事业的激情。
现在，我们将其带给我们的客户。

Siemens Gamesa 5.X 产品平台再创新高：

- **在性能表现方面**：更高的成本效益和可靠性。
- **在能量产出和叶片直径方面**：5.8 MW额定功率与155/170米叶片结合带来更有竞争力的LCoE。
- **在技术方面**：基于Siemens Gamesa的技术与专业知识。
- **在通用性方面**：拥有更高的灵活设计方便运输、建设以及运维。
- **在风场适应性方面**：为每一个项目量身定制解决方案。
- **在价值方面**：一切为我们的客户。

www.siemensgamesa.com

SIEMENS Gamesa
RENEWABLE ENERGY
西门子歌美飒

广告

主管：工业和信息化部　**主办：**中国电子信息产业发展研究院、赛迪工业和信息化研究院（集团）有限公司　**出版：**北京赛迪出版传媒有限公司

风能
WIND ENERGY

中国可再生能源学会风能专业委员会
2021年 第03期

顾问 **Consultant**

石定寰　史立山　杜祥琬　黄其励　Shi Dinghuan Shi Lishan Du Xiangwan　Huang Qili
徐建中　倪维斗　胡文瑞　杨裕生　Xu Jianzhong Ni Weidou　Hu Wenrui Yang Yusheng
李宝山　韩文科　朱俊生　贺德馨　Li Baoshan Han Wenke Zhu Junsheng He Dexin
王承煦　朱瑞兆　戴慧珠　马学禄　Wang Chengxu　Zhu Ruizhao Dai Huizhu Ma Xuelu
王斯永　吴运东　齐同庆　于午铭　Wang Siyong Wu Yundong Qi Tongqing　Yu Wuming
宫靖远　Gong Jingyuan

社长：夏丽华　**President:** Xia Lihua
主编：施鹏飞　**Editor-in-Chief:** Shi Pengfei
执行主编：秦海岩　**Executive Editor-in-Chief:** Qin Haiyan
副主编：王仲颖　于贵勇　**Associate Editor-in-Chief:** Wang Zhongying Yu Guiyong

编辑部主任：秦海岩（兼）　**Editorial Director:** Qin Haiyan
编辑部副主任：薛　辰　夏云峰　**Deputy Editorial Director:** Xue Chen Xia Yunfeng
主笔：王　芳　**Editor in Chief:** Wang Fang
编 辑：时春景　孙一琳　**Editor:** Shi Chunjing Sun Yilin
本期责编：夏云峰　**Duty Editor:** Xia Yunfeng
视觉设计：荆　莹　刘　湛　**Visual design:** Jing Ying　Liu Zhan
广告部经理：刘晓旭　**Advertising Manager:** Liu Xiaoxu
发行部经理：刘晓旭　**Distribution Manager:** Liu Xiaoxu

编辑制作：《风能》杂志社　**Produced by:** *Wind Energy* Magazine
地址：北京市东城区和平里北街6号　**Address:** 3 Floors, Building 26, Far East Cultural Park
远东文化园26楼3层　No. 6 Hepingli North Street Dongcheng District, Beijing, PRC
邮编：100013　**Zip Code:** 100013
电话：010-59796665-3615（编辑部）　**Tel:** 010-59796665-3615（Editorial）
010-59796665-3501（广告部）　010-59796665-3501（Advertising）
010-59796665-3501（发行部）　010-59796665-3501（Distribution）
传真：010-64228215　**Fax:** 010-64228215
投稿邮箱：gaojian@cwea.org.cn　**E-mail:** gaojian@cwea.org.cn

国际标准刊号：ISSN 1674-9219
国内统一刊号：CN 11-5942/TK
广告发布登记号：京海工商广登字20170178号
印刷：北京久佳印刷有限责任公司
出版日期：每月6日出版
发行范围：全国发行
国内定价：人民币25元

声 明

◆本刊图文版权所有，如需转载，请与本刊编辑部联系。
◆向本刊投稿（图片）文责自负，由作者原稿产生的版权或其他法律责任，本刊概不承担连带责任。
◆为适应我国信息化建设，扩大本刊及作者知识信息交流渠道，本刊已被《中文科技期刊数据库》（维普网）、龙源期刊网、《中国核心期刊（遴选）数据库》、中国知网等多个数据库收录，并在相关网站提供在线阅读和下载服务。如作者不同意文章被收录或数字出版，请在来稿时向本刊书面声明，本刊将做适当处理。

VERTIV™
维谛技术

Win TRUST

高可靠合作伙伴

Highly reliable cooperation partner

恒久在线 共筑未来

Architects of Continuity ™

维谛技术有限公司

地址：深圳市南山区学苑大道1001号南山智园B2栋

邮编：518055　网址：www.Vertiv.com

电话：0755-86010808

广告

中央一号文件要求实施乡村清洁能源建设工程

2 月 21 日，21 世纪以来第 18 个指导“三农”工作的中央一号文件——《中共中央 国务院关于全面推进乡村振兴加快农业农村现代化的意见》（下称《意见》）发布，全文共 5 个部分，包括：总体要求、实现巩固拓展脱贫攻坚成果同乡村振兴有效衔接、加快推进农业现代化、大力实施乡村建设行动、加强党对“三农”工作的全面领导。

《意见》指出，民族要复兴，乡村必振兴。要坚持把解决好“三农”问题作为全党工作重中之重，把全面推进乡村振兴作为实现中华民族伟大复兴的一项重大任务，举全党全社会之力加快农业农村现代化，让广大农民过上更加美好的生活。

《意见》要求加强乡村公共基础设施建设。实施乡村清洁能源建设工程；加大农村电网建设力度，全面巩固提升农村电力保障水平；推进燃气下乡，支持建设安全可靠的乡村储气罐站和微管网供气系统；发展农村生物质能源；加强煤炭清洁化利用；加强乡村公共服务、社会治理等的数字化智能化建设；实施村级综合服务设施提升工程。

《意见》提出实施农村人居环境整治提升五年行动。推进村庄清洁和绿化行动；开展美丽宜居村庄和美丽庭院示范创建活动。

《中国城市大规模推广建筑领域可再生能源利用研究报告》发布

2 月 4 日，世界自然基金会（WWF）与德国能源署共同发布《中国城市大规模推广建筑领域可再生能源利用研究报告》。

报告指出，在二氧化碳排放达到峰值与实现碳中和的过程中，城镇范围建筑领域可再生能源大规模的利用将发挥重要作用。报告根据详实的分析，认为在城镇范围内大规模推广建筑领域可再生能源利用，是中国应对气候变化和实现可持续发展的有效路径之一。可再生能源的特性决定了其在生产、存储、分配和使用中需要系统化的解决方案。

报告介绍了适宜在城镇范围内用于建筑领域的可再生能源，主要包括太阳能、风能、地热能和生物质能等。

报告建议，为实现建筑领域可再生能源利用的大规模推广，一方面，需要针对单项可再生能源提出创新的发展理念，如光伏建筑一体化；另一方面，也应挖掘建筑组群或园区中多种可再生能源利用方式相互协作的潜力，如实施园区一体化方案，实现集群效应。此外，对于一些特定的可再生能源，如地热能、生物质能和风能利用，城镇也可积极与周边区域合作，推动优势互补。

2020年第四季度全国新能源电力消纳情况公布

2 月 5 日，全国新能源消纳监测预警中心发布的分析报告显示，截至 2020 年 12 月底，风电、光伏并网装机容量分别达到 2.8 亿千瓦、2.5 亿千瓦。

其中，风电新增并网装机容量实现历史性突破。第四季度，全国风电新增并网装机 5625 万千瓦，同比增长 360.3%，增速较 2019 年同期提升 313.8 个百分点，第四季度新增并网装机容量占全年新增并网装机容量的 80.6%。新增并网装机规模超过 300 万千瓦的地区包括：蒙东（677 万千瓦）、河南（658 万千瓦）、山西（545 万千瓦）、河北（524 万千瓦）、江苏（398 万千瓦）、新疆（351 万千瓦）、青海（321 万千瓦）、陕西（309 万千瓦）。2020 年，风电新增并网装机 7167 万千瓦，同比增长 178.4%。截至 12 月底，全国风电累计并网装机 2.81 亿千瓦，同比增长 33.1%。第四季度，海上风电新增并网装机 149 万千瓦，同比增长 50.5%。截至 12 月底，全国海上风电累计并网装机容量达到 899 万千瓦，同比增长 51.6%。

山东全力开创经略海洋新局面

2月2日，山东省十三届人大五次会议开幕，山东省省长李干杰作政府工作报告。

报告指出，今后五年，山东将坚持系统观念，加强前瞻性思考、全局性谋划、战略性布局、整体性推进，统筹稳增长、促改革、调结构、惠民生、防风险、保稳定，奋力推进新时代现代化强省建设。

报告提出，突出陆海统筹向海图强，全力开创经略海洋新局面。深入实施海洋强省战略，打造国际领先的海洋经济示范区。建设以青岛港为中心的国际航运枢纽，健全港口集疏运体系，加快港产城深度融合。推动海洋高端装备制造核心设备自主化，做强海洋生物产业集群，加快海水淡化和综合利用产业规模化发展，高水平建设“海上粮仓”、国家深远海绿色养殖试验区、国家远洋渔业基地。制定实施中远海风电发展规划，支持烟台建设北方风电母港。建设中科院海洋大科学研究中心、国家深海基地、国家浅海综合试验场，在透明海洋、蓝色生命等领域牵头实施国家重大科技工程。深化陆海污染统筹治理，实施蓝色海湾整治行动，创建长岛海洋类国家公园。

江西提出2025年新能源装机容量将超1900万千瓦

2月5日，江西省政府发布《江西省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》（下称《纲要》）。

《纲要》要求积极应对气候变化。严格落实国家节能减排约束性指标，制定实施全省2030年前碳排放达峰行动计划，鼓励重点领域、重点城市碳排放尽早达峰。大幅降低能耗强度，有效控制能源消费增量，强化节能法规标准等落实情况监察。加快产业结构、能源结构调整，深入推进能源、工业、建筑、交通等领域节能低碳转型，推动全省煤炭占能源消费比重持续下降。严格落实能耗总量和强度“双控”制度，严控新上高耗能项目，狠抓重点领域和重点用能单位节能，推进重点用能单位能耗监测管理全覆盖。探索建立温室气体排放统计核算体系，建立“天地空”一体化生态气象观测体系，提高应对极端天气和气候事件能力。推动甲烷、氢氟碳化物、全氟化碳等温室气体排放量持续下降。

《纲要》提出加快建设现代能源体系。坚持“适度超前、内优外引、以电为主、多能互补”的原则，加快构建安全、高效、清洁、低碳的现代能源体系。积极稳妥发展新能源，到2025年，力争新能源装机达到1900万千瓦以上。其中，风电、光伏装机容量分别达到700万千瓦、1100万千瓦。

云南规划2025年绿色电源装机占比将突破86%

2月8日，云南省政府印发《云南省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》（下称《纲要》）。

《纲要》要求坚持生态优先、绿色发展，提出打造世界一流“绿色能源牌”，做强做优绿色能源产业，延伸能源产业链。“十四五”期间，云南将建成国家清洁能源基地，优先布局绿色能源开发，以绿色电源建设为重点，加快金沙江、澜沧江等国家水电基地建设。统筹协调风能、太阳能等新能源开发利用，以金沙江下游、澜沧江中下游大型水电站基地以及送出线路为依托，建设“风光水储一体化”国家示范基地。到2025年，全省电力装机达到1.3亿千瓦左右，绿色电源装机占比达到86%以上。

在具体项目方面，“十四五”期间，云南将规划建设31个新能源基地，总装机规模为1090万千瓦，积极推进建设金沙江下游、澜沧江中下游、红河流域“风光水储一体化”基地以及“风光火储一体化”示范项目新能源装机共1500万千瓦。

中国华能集团有限公司 CHINA HUANENG GROUP CO., LTD.

华能发行首批碳中和绿色债券

2 月 25 日，中国华能集团有限公司发行 2021 年度第一期专项用于碳中和绿色公司债券，成为交易所市场首批碳中和绿色债发行企业。本期债券发行规模 20 亿元，期限 2 年，票面利率 3.35%。

据悉，碳中和绿色债作为绿色债券的一个子品种，其募集资金将主要用于经认证具有碳减排效益的绿色产业项目建设、运营、收购以及偿还碳中和项目贷款等，通过节能减排、充分使用可再生能源等方式，减少碳排放，推进绿色发展。

此外，为加强前瞻性研究及战略性布局，中国华能集团有限公司统筹研究资源，于近日成立华能碳中和研究所。

该研究所将依托华能能源研究院，开展碳中和战略方向、演进规律与科技创新等方面的基础研究，重点研究碳中和对国家能源体系、能源市场、供需关系等产生的影响，再电气化对实现碳中和目标的关键作用，中国华能实现碳中和目标的路径及关键技术选择等。

Vestas

维斯塔斯推出V236-15.0MW海上风电机组

2 月 10 日，维斯塔斯宣布推出 V236-15.0MW 海上风电机组，预计将于 2024 年实现批量生产。这是目前全球单机容量最大的风电机组，达到 15MW，风轮直径为 236 米。

V236-15.0MW 整合了维斯塔斯现有风电机组平台的设计经验，包括 9 MW 平台和 EnVentus 平台，通过模块化方法扩展零部件的规模，从而提升风电机组设计的工业化水平，并推动平台的进一步发展。

V236-15.0MW 风电机组具有全球最大的叶轮扫风面积，超过 43000 平方米，性能处于行业领先水平，年发电量可达 8000 万千瓦时，能满足约 2 万个欧洲家庭的用电需求。

与 V174-9.5MW 相比，该机型的年发电量可提高 65%。对于装机容量为 90 万千瓦的风电项目而言，所用机组数量将减少 34 台，发电量提升 5%。V236-15.0MW 机型具有出色的部分功率（partial-load）发电能力，可实现更稳定的功率曲线输出。根据特定场址条件，该机型的容量系数有望超过 60%。

数据

503.316 万千瓦

2 月 10 日，国家电网公布了 2021 年第三批可再生能源发电补贴项目清单，共 1637 个项目，核准 / 备案容量为 503.316 万千瓦。其中，集中式风电项目数量为 3 个，核准 / 备案容量为 13.95 万千瓦。

5.22 亿千瓦

根据《亚太地区退煤与能源转型路径》（*Coal Phase out and Energy Transition Pathways for Asia and the Pacific*）报告，目前，亚太地区计划和宣布建设的燃煤电厂占全球的 94%，总装机约 5.22 亿千瓦。

18%

联合国环境规划署通过跟踪过去一年全球五十大主要经济体的经济复苏支出情况，发现在 2020 年，仅有占全球复苏支出 18%（占全球总支出的 2.5%）的资金属于“绿色复苏支出”。

国际热点

英国

2 月 8 日，英国公布了海上风电第四轮海床租赁第二阶段招标结果：RWE Renewables 中标 300 万千瓦；绿色投资集团与 Total 中标 1500 万千瓦；EnBW 与 bp 中标 300 万千瓦；Offshore Wind Limited 中标 0.48 万千瓦。

韩国

据韩联社报道，2 月 5 日，韩国新安海上风力发电项目产业园投资签约仪式举行。据悉，该项目的总装机容量为 820 万千瓦，到 2030 年，项目投资金额将达到 48.5 万亿韩元（约合人民币 2833 亿元）。

美国

2 月 20 日，《经济学人》杂志发表文章称，普林斯顿大学的一项研究估计，为走上净零排放的道路，在未来十年内，美国高压输电能力需增加 60%，至少要投入 2.5 万亿美元（约合人民币 16.4 万亿元）的额外资金。

越南

2 月 4 日，越南广治省批准了投资总额接近 5.8 万亿越盾（约合人民币 16.44 亿元）的 3 个风电项目，包括风原风电项目、风辉风电项目和莲立风电项目。每个项目将安装 12 台风电机组，装机容量为 4.8 万千瓦。

19652.7 亿元

2 月 17 日，国际氢能委员会（Hydrogen Council）与麦肯锡（McKinsey）联合发布的报告显示，到 2030 年，30 余个国家和地区的氢能项目投资总价值将超过 3000 亿美元（约合人民币 19652.7 亿元）。

600 万千瓦

2 月 25 日，全球风能理事会（GWEC）发布的全球海上风电装机数据显示，2020 年，全球海上风电新增装机容量超过 600 万千瓦，为历史最高水平。中国以超过 300 万千瓦的新增装机，连续第三年领跑全球海上风电市场。

86.8 万个

能源咨询公司 Rystad Energy 预测，到 2030 年，全球海上风电从业人员的需求将增加 2 倍，工作岗位数量将从 2020 年的 29.7 万个增至 86.8 万个。因具备相关联的技能和知识，石油与天然气行业的工人也将从中受益。

新型电力系统需要“新”在何处?

文 | 本刊特约评论员 张树伟

张树伟
卓尔德环境研究（北京）中心主任
兼德国能源转型智库高级顾问

3 月 15 日召开的中央财经委员会第九次会议提出，实施可再生能源替代行动，深化电力体制改革，构建以新能源为主体的新型电力系统。那么，在我国，可再生能源对传统化石能源电力的替代已经到了何种程度？以新能源为主体的新型电力系统，需要“新”在何处？本期专栏文章将重点讨论这些问题。

近年来出现的“苗头”表明，在我国，可再生能源代替化石燃料发电的节奏处于不升反降之中。现今，人们往往满足或惊讶于我国的可再生能源发电装机容量快速增长，基于绝对数字形成看法、观点。这是毫无意义的。相比其他国家，我国的可再生能源发电装机规模优势突出，2020 年风、光新增并网装机容量总和超过 1 亿千瓦。然而，两者发电量占全国总发电量的比重（2020 年为 9.5%），仍低于世界平均水平（2020 年为 10%）。在过去的几年中，由于煤电发电量与可再生能源发电量的增长保持齐头并进，甚至前者在绝对值上高于后者，我国的电源结构优化节奏在变慢，2019 年之后已经很难保持在每年提高 1% 的水平上。

电力是减排选项最多、成本低，甚至存在“无悔”选择的领域。过去 10 年，风电与光伏发电成本的大幅下降为电力领域的快速脱碳提供了现实选择。但必须意识到，如果不对我国的既有电力体系运行与调度范式作出重大调整，落实高比例风、光的绿色议程仍是困难的。调度尺度的更加精细化，以及承载它的经济调度原则的采用，仍旧是必要的。否则，我国的风、光发电量占比长期低于世界平均水平将是大概率事件。

“新”在技术

新型电力系统需要首先“新”在技术，比如物联网与区块链技术。当下，智能电网发展方兴未艾。物联网技术有望为电力系统运行提供更好的需求响应资源；区块链技术有助于开展分布式交易，大大降低交易难度，提高结算效率，特别是计量、票据、企业组织、参与市场会员等方面的费用有可能会下降。然而，需要特别指出的是，区块链技术在我国能源领域的应用已走入歧途——往往用于标记那些本属于统一

市场的某个电源（所谓“溯源”）[1]，破坏以边际成本为基础的市场竞争格局，掺合很多不相干而又很难比较的其他标准，这与统一市场建设背道而驰。

借助大数据技术与机器学习，可以对能源消费行为进行分析，并得出洞见以改善能源使用效率，这是能源系统数字化的根本目的。在这方面，广为人知的是 Google Deepmind 所进行的探索。其设计的算法可以更准确地预测数据中心的能耗，据此调控制冷系统，提高制冷效率。据称，借助这套系统，数据中心的能耗可以降低 40%（Jucikas，2017）[2]。将其用于英国电网的预测与运行，据称可以减少 10% 的全国电力使用量（Evans，2016）[3]。

实施数字化的出发点是提高效率，特别是系统运行以及用电等多方面的效率。数字化技术能够帮助电力系统更快、更好地进行决策。那么，我国的电力系统有必要进行更快、更好的决策吗？从可再生能源接入的角度来说，答案是肯定的；就对调度机构的要求与激励而言，答案却是否定的。

“新”在机制

未来我国的电力结构，需要的是高比例可再生能源加上大容量，但利用率低的天然气单循环发电。由于风、光发电存在波动性，其总装机容量会高出最大负荷的 2~5 倍[4]，从而使其他机组的利用小时数都非常有限。因此，未来的机组必须是灵活的、低资产密度的，这对于电力技术未来的发展具有很强的启示性。比如核电与煤电，只有朝着足够小型化、模块化（比如“高温气冷堆”）的方向发展才具有前途；从长远来看，天然气机组的燃料还可以广泛来源于电解水制氢之后的“甲烷化”（“Power to X”技术系统与应用），进而解决煤炭彻底退出后的剩余碳减排问题。

这样的系统，需要更加灵活的运行与短期预测能力，以及对各种可再生能源的友好接入，提供开放的统一市场“池子”（pool）。非常遗憾的是，目前，我国在可再生能源成本大幅下降之后鼓吹的所谓“中长期交易”，以及“市场化交易”，都已经出现赌博性质的苗头。

市场构建是需要很高能力的。诺贝尔经济学奖获得者 Alvin Roth 曾经概括[5]：

——市场可以自然发展，也可以设计；

——市场处于一个频谱之中，介于亚当·斯密描述的完全自由竞争市场与计划经济之间；

——市场有明确的规则；为了避免激烈竞争，市场必须很“厚”（thick），容量要足够大，否则容易形成“狗吃狗”的惨烈竞争；但如果市场太“厚”，可能会造成堵塞，无法开展交易。

在我国当前推行的用户与电厂直接交易中，上述问题几乎在不同时间

借助大数据技术与机器学习分析能源消费行为，并得出洞见以改善能源使用效率，这是能源系统数字化的根本目的。

1:比如，这里的噱头：http://www.zqrb.cn/jrjg/hlwjr/2021-02-07/A1612694197069.html

2:Jucikas, T., 2017. Artificial Intelligence and the future of energy. WePower.

3:Evans, G., 2016. DeepMind AI Reduces Google Data Centre Cooling Bill by 40% | DeepMind [WWW Document]. Deep. AI Reduces Google Data Cent. Cool. Bill 40. URL https://deepmind.com/blog/deepmind-ai-reduces-googledata-centre-cooling-bill-40/ (accessed 8.27.18)

4:Jenkins, J. D., Luke, M., & Thernstrom, S. (2018). Getting to Zero Carbon Emissions in the Electric Power Sector. Joule, 2(12), 2498 – 2510. probability. https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.11.013

5:Roth, A. E. (2015). Who gets what—and why: The new economics of matchmaking and market design. Houghton Mifflin Harcourt.

与地区都不同程度地存在，反映出比较大的市场设计缺陷。

电力市场需要提供足够的基础设施，便于交易。市场应该让参与者感到安全又简单，而不是冒险赌博。在当前的所谓可再生能源参与“市场化交易”中，广大业主往往找不到交易方(电网“池子”没了)，对价格完全缺乏预期，有时则限期很快完成，已经成为一种“赌博”。因此，对于业主“自愿参加的积极性恐怕不高，参加电力市场已经不是平价上网了，而是低价上网”[6]的抱怨，就不难理解了。这完全是市场设计问题，而与道德觉悟高低无关。

下一篇本专题系列文章，将专门讨论这个问题。

总之，新型电力系统需要“新”在机制，特别是调度采取何种机制以保持系统平衡。在我国的电力系统中，调度仍旧扮演着“指挥官”的角色，而并非一个平等的市场参与者。它不需要“购买”平衡资源以待调用，仅靠一纸行政命令“70% 以内的调节都免费”，就能将所有机组都作为备用资源。这部分缺乏定价方法（也可以说是定价为“0”），也不需要定价。所以，这些机组不是系统备用，而是脱离系统安排的电网备用。它没有动力尽量去优化运行、减少备用，以节省成本。目前的调度自由度过大(除了受年度电量约束)，这一点亟需更加透明的讨论。

“新”在体制

构建新型电力系统，必须彻底放弃“傻大笨粗”的大容量发电机组以及输电线路。这些物理基础设施往往需要保持高利用率，才能具有经济可行性，这在以新能源为主体的电力系统中是完全不现实的。以新能源为主体的系统与“大容量、大机组、大输电”的体系，“八字”不合。

构建新型电力系统，必须彻底放弃大容量发电机组以及输电线路，它们需要保持高利用率，才能具有经济可行性。

构建新型电力系统，挑战着用大工程解决大问题，而往往造成新的更大问题的习惯做法。多元化、多样化的安排，通常是可再生能源并网所必须的。因为它们足够小，所处的区域资源技术特点各异，有的适合独立运行，有的适合与小型储能联合，有的适合并入高压电网。大工程解决大问题的习惯做法，完全无法顾及这些精细化的要求，反而容易造成系统运行的进一步僵化。随着可再生能源占比的增加，这方面的方式冲突会愈加激烈。

小结

新型电力系统，需要“新”在技术——通过数字化技术提高系统状态识别、调节响应与灵活安排的能力；需要“新”在机制——如何更加精细化地实现系统平衡，调整电源与调度的责任界面，使后者完全成为一个维护系统平衡的专业化机构，利于可再生能源并网；更加需要“新”在体制——如何纠正对大项目、“一刀切”的不当偏好。

在本质上，高比例可再生能源接入电力系统，挑战着过去粗尺度、自由量裁与“指挥官式”的粗糙、但稳健的调度运行体系。可再生能源加上数字化技术，无疑将重塑电力、能源系统与社会体系。只是，我们还需要等待那个临界点（tipping point）的到来。

临界点是什么？是更多的行业内专家与公众真正理解这个系统到底如何运行，以及应该如何运行的时候。

6:http://www.cspplaza.com/article-18702-1.html

3.0-3.5MW | 4.0-4.5MW | 7.0MW | 10MW | EPC

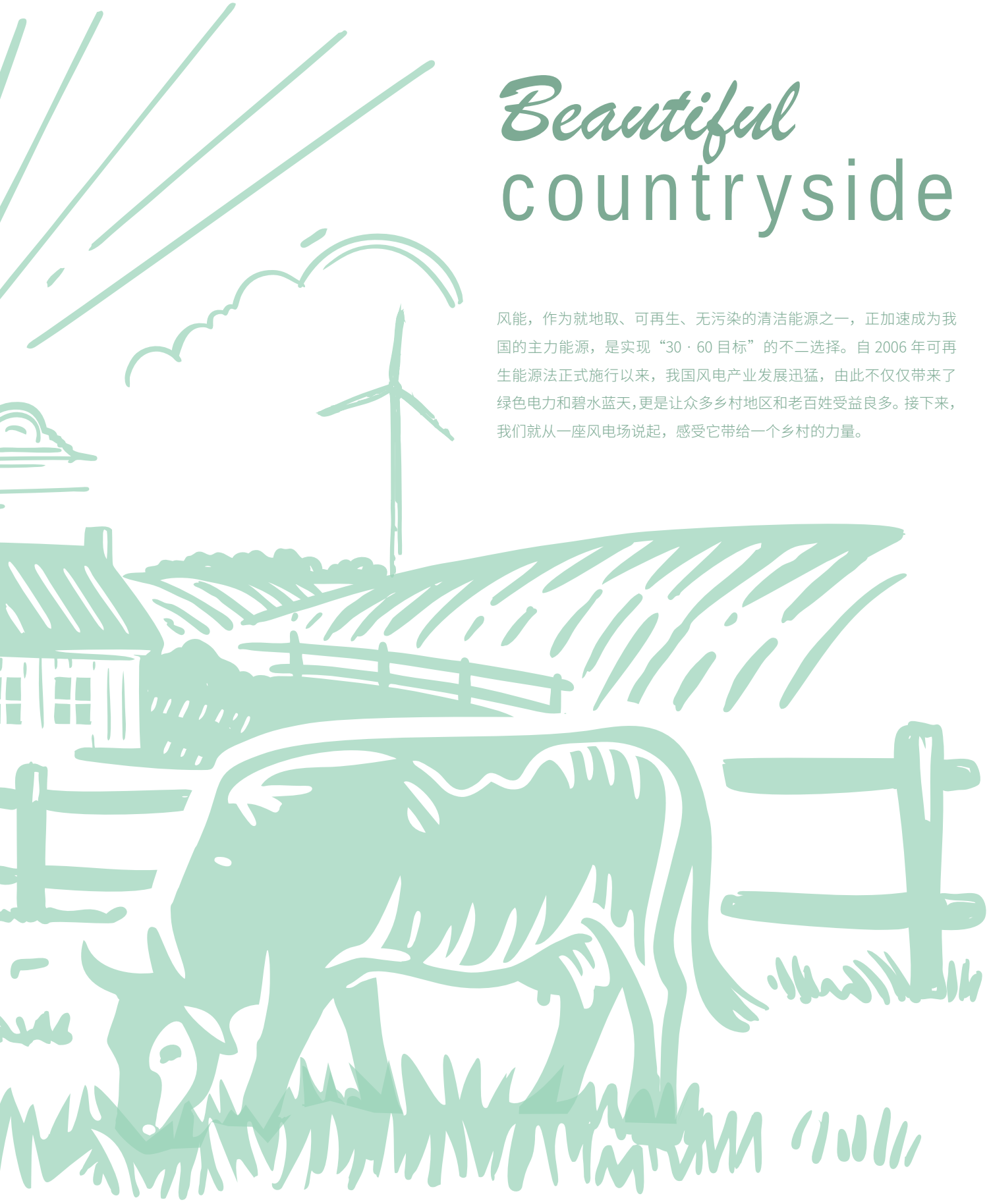
求实 Practical | 创新 Innovative | 人和 Harmonious | 图强 Diligent

东方电气风电有限公司
地址：四川省德阳市华山南路二段2号
传真：0838-2821700

广告

Beautiful countryside

风能，作为就地取、可再生、无污染的清洁能源之一，正加速成为我国的主力能源，是实现“30 · 60 目标”的不二选择。自 2006 年可再生能源法正式施行以来，我国风电产业发展迅猛，由此不仅仅带来了绿色电力和碧水蓝天，更是让众多乡村地区和老百姓受益良多。接下来，我们就从一座风电场说起，感受它带给一个乡村的力量。



当小镇有了风电

文 | 赵福艳，陈远灿

位于北回归线之南的广东省茂名信宜市合水镇，森林覆盖率高达 68%，放眼望去，遍地茂林翠竹。离镇子不远处，坐落着广东省重点建设风电项目——茂名中坳风电场，它是粤西首个山地风电项目。立于其上，油然而生“一览众山小”的豪迈感。站在山脚下仰望，山头上“风车”林立，叶片随风劲舞，与蓝天白云交相辉映，景色雄伟壮观，宛如仙境。美景吸引了游客纷至沓来。在 2021 年春节期间，“风车”之下的山坪上，山头之间的通道上，游人如鲫，热闹非凡。

然而，项目建设伊始呈现的却是另一番景象。时间回到十年前，据现场工作人员回忆，中坳风电场的场址区位于经济相对落后的山区，道路条件差，交通不便给项目施工造成不少阻碍。考虑到这座风电场靠近合水镇，修好道路与桥梁，不仅可以满足项目施工建设与后期运维的需要，还能为区域经济社会发展提供基础支撑。针对于此，开发商华电集团决定在道路疏通及硬化上加大投入。中坳风电场完工后，华电集团建成 17.2 千米长、6 米宽的山路，它既可用作村民耕山道路及防火通道，也能作为旅游交通通道。

此外，作为茂名地区第一个风电项目，在茂名市政府的高度重视下，中坳风电有限公司为现场水土保持及绿化投入了近 500 万元，复绿风电机组平台 6.6 万平方米，复绿道路边坡 20 万平方米，种植的红花荷、果树、爬山虎长度接近 5 千米。

现如今，登上海拔 1000 多米的中坳山峰极目远眺，高大的风电机组塔筒矗立于高山群峰，劲风吹得叶片呼呼打转，风电场道路环山迂回，满目青翠。低头细看，机组旁、道路边绿草油油，像极了翠绿的地毯，新植的一棵棵红花荷绿叶满枝，迎风摇曳。

交通条件的改善，极大便利了当地居民的生产生活，也创造出实实在在的经济效益。

据上述工作人员透露，一位合水镇的居民在与他聊天时谈到，当地人多以种植果树、务农为生，收入来源单一。自从风电场建设让道路畅通后，来往的人明显多起来，闲置资产也得到充分利用，居民收入增加了，还吸引年轻人回乡创业、就业。通过各种渠道被带出大山的特产，让更多人知道合水镇。

合水镇拥有得天独厚的气候条件，水果资源丰富，钱排银妃三华李是当地最具特色的水果之一。之前，由于信息闭塞、运输不便，合水镇的三华李销量一直不温不火。

借着中坳风电场建设的契机，当地政府进一步加大特色水果品牌的推广力度，钱排银妃三华李的知名度迅速提升，给老百姓带来可观的收益。

同样得到快速发展的还有旅游业。中坳风电场的不远处，便是广东珠江支流南江的发源地——鸡笼顶。其因主峰形似鸡笼而得名，为岭南僚文化的圣山，因神奇、高峻、秀美而素有“人间天堂”的美称。2012年中坳风电场建成后，交通的便利带动了鸡笼顶景区的开发。

2016年5月初，合水镇政府举办了以推介鸡笼顶景观为主要内容的首届“南江源头客家文化节”，一时间，合水镇成为远近闻名的旅游热点。现在，鸡笼顶早已是登山运动、户外踏青、驴友掠影的好去处，每年“五一”期间，游览鸡笼顶风光的游客多达数万人。

截至目前，中坳风电项目已经平稳运营九年有余，33台明阳智能风电机组的发电表现得到华电集团的认可。在这背后，除了机组设计上的高可靠性外，明阳智能还与华电集团在运维方面达成一致，采取机组责任制，旨在确保机组保持最佳运行状态，做到发电量最优。

据悉，中坳风电项目的年发电量达9200万千瓦时，相当于节约3.22万吨标准煤，将大幅减少当地的二氧化碳、二氧化硫等有害气体排放，对推动经济发展和节能减排、完成国家制定的能耗“双控”指标具有重要意义。

中坳风电场只是风电带动乡村地区发展的一个缩影。“十四五”时期，是我国在全面建成小康社会、实现第一个百年奋斗目标之后，乘势而上开启全面建设社会主义现代化国家新征程、向第二个百年奋斗目标进军的第一个五年。2021年中央一号文件指出，民族要复兴，乡村必振兴。风能作为发展最成熟的新能源之一，在“30·60目标”的指引下，发展势必会提速，将为我国向绿色低碳转型提供关键支撑。同时，伴随技术的进步，更多风电机组会被安装到田间地头、村前屋后、乡间路上，在将绿色风能转化为清洁电力的过程中，让老百姓过上更美好的生活。

分秒必争，当好机组“医生”

文 | 张晓雷 新疆金风科技股份有限公司

踏入风电行业已有近 10 个年头，期间遇到过包括“老大难”问题在内的无数个机组故障。故障多停留一秒，就可能多损失一份发电量。每次与风电场的开发商朋友算起因故障引发的机组发电量损失时，既痛心于能源的极大浪费，也总在反思，是不是解决方法还不够好？故障能不能更早些消除？多年的故障处理经验告诉我，“困难像弹簧，你强它就弱，你弱它就强”。依靠经验的积累、专业技能的提升，以及团队协作能力的增强，再大的故障难题也能迎刃而解。

在所有的风电机组故障中，偏航和变桨系统故障是最常见的类型之一。该系统是保障机组正常运行发电的基础，倘若它出了问题，机组便无法实现精准对风，风能捕捉利用的效率和效果会大打折扣，严重影响机组的发电能力。

2020 年 3 月 29 日，湖南某风电场的 2 号机组出现 1 号叶片叶尖位置异常，目测观察疑似有轻微开裂。现场运维人员登机后发现，该机组 1 号变桨机械发生故障。

接到现场反馈后，公司迅速成立故障分析及问题解决专项组，确定人员组成及分工。项目组成员第一时间赶赴项目现场开展勘查分析工作。经现场检查发现，1 号叶片叶尖部分存在异常（对该状况进行了记录和测量）。对变桨机械进行登机查验发现，变桨传动部件发生失效，1 号叶片无法实现变桨功能。

除了在现场和实验室对失效部件进行精准测量分析，项目组成员及时拷贝了机组故障时刻的相关失效数据，并在 24 小时内完成了对故障时刻整机载荷的分析。结合机组运行状态及失效部件特征，锁定了此次故障发生的主要原因：偶发极端风况下变桨机械部件失效。

项目组根据分析的结果制定出切实可行、评审合格的预控措施，并将其准确及时地传达给现场同事。采取该措施后，故障机组在 48 小时内即恢复运行。此外，项目组一周内完成了全场运行控制策略的优化，并结合机组的年检进度开展了变桨机械部件的检查工作，有效规避或降低了机组的潜在风险。

辽宁某风电场的 8 号机组自 2020 年 9 月投运以来频繁报偏航使能异常警告，偶发偏航空开跳闸。登机检查发现偏航减速器存在轻微异响，偏航电机电磁刹车存在一定的磨损，部分刹车片存在过快消耗的情况，可能会缩短刹车片的更换周期。当时正值大风期，是机组发电出力的黄金时段，因偏航系统功能异常导致机组警告频发，会造成一定的发电量损失。

公司内部立即成立问题分析及解决专项攻关小组，小组成员以 DMAIC 流程方法论为指导，对问题展开全面分析。协调现场运维同事在 24 小时之内完成 8 号机组故障时刻运行历史数据的提取和分析，叠加故障时刻风能资源历史数据，发现该机组发生偏航故障的主要原因为其在偏航过程中，风向发生突变（机位点处受特定山体遮挡影响，极端风况严重），外界载荷超出机头控制载荷，导致机头被风吹得偏离原有位置，当速度超过减速器设定的极限值时发生减速器损坏，同时机头转动造成刹车片加速磨损。

确定故障原因后，专项组制定了偏航控制软件优化升

级(偏航需求响应时间参数调整)和硬件改造(增加变频启动控制单元）的技改方案。方案一经敲定，各子任务的责任人迅速行动。硬件改造的责任人在 72 小时之内完成采购和安装调试工作，软件升级的责任人在 24 小时之内完成偏航控制软件升级版本的下发和更新，仅仅耗时 5 个工作日即完成了故障处理，大幅缩减故障时间，最大程度保障机组在大风期的发电量。

时光如逝，不经意间自己参与处理的机组故障已经不计其数。每当看到自己“诊治”过的风电机组，随着启机按钮的触发而迎风旋转，塔底主控柜显示屏上的机组功率曲线迎风上扬，缓缓接近满发状态，成就感油然而生，一切付出和努力都是那么值得。

然而，因长时间“泡在”风电场，缺席了孩子的成长，又让我内心满是愧疚。犹记得一个周五的晚上，孩子兴冲冲跑来对我说：“爸爸，好久没有陪我去游乐场玩了，这周末能带我去吗？”还没来得及回答，手机铃声突然响起，像往常一样又是一项紧急任务，需马上前往风电场解决停机故障。一边是孩子期盼的眼神，一边是经不起任何耽搁的机组重启，真恨不得那一刻自己可以分身。然而现实却只允许我满怀歉意地对孩子说：“乖宝贝，等下次爸爸不出差了，再带你去游乐场玩个痛快。”

一次又一次的“下次”，让我觉得自己亏欠孩子太多。但肩负着“为人类奉献碧水蓝天，给未来留下更多资源”的使命，一切的付出和努力就是值得的。对于家庭的缺憾，等孩子再长大些，给他讲讲风力发电的故事，相信他会理解爸爸的“苦衷”。

正是一个个普通风能人的不懈坚守和努力，推动着风电技术不断进步，使风电设备的利用小时数稳步提升。相信在不久的将来，依靠全体风能人同心协力，“30 · 60 目标”一定能够实现。作为一名风电“老兵”，我也会继续苦修内功，为风电机组“听好诊、把好脉”，当好机组“医生”！

平价时代，深挖潜能算好账

本刊 | 王芳

受访人：龙源电力集团股份有限公司党委副书记、总经理 唐坚

平价 / 竞价上网的大变局下，风电产业链利润回落已成大势所趋，开发企业将面对更低的电价、更多的附加成本以及更紧俏的资源。如何增加收益？龙源电力集团股份有限公司党委副书记、总经理唐坚认为，应深挖风电场的潜能，算好经济账，加强存量市场的运营管理，全方位提高开发运行质量。

节流，消除影响收益的多重因素

Q：龙源电力集团股份有限公司（下称“龙源电力”）作为全球规模最大的风电开发企业，在“十三五”期间取得了哪些成绩？

A：围绕“建设具有全球竞争力的世界一流新能源公司”的总目标，“十三五”期间，龙源电力继续在风电领域稳健前行。2019年，龙源电力成为全球第一家累计装机容量突破2000万千瓦的风电运营商，稳坐中国风电开发的“头把交椅”。2020年，龙源电力超额完成集团公司下达的“投产228万千瓦、开工309万千瓦”的“新能源500万+行动计划”任务，并且布局了两个千万千瓦级能源基地。截至2020年年底，龙源电力拥有300多座风电场，累计装机容量达到2532万千瓦。

Q：“十四五”时期，中国风电产业开启了平价 / 竞价时代，开发企业的收益受到哪些因素的影响？呈现怎样的发展趋势？

A：步入平价 / 竞价时代后，整个风电行业的利润空间遭到压缩，尤其是早期应用的单机容量较小的风电机组，利用小时数低，收益明显低于预期。行业竞争更加激烈，需要开发度电成本更低的项目。但以往影响行业收益水平的非技术因素仍未消除，大大增加了企业的负担。

首先，全额保障性收购制度落实不到位，低价或负电价收购以及弃风限电，仍旧是侵蚀企业利润的主要原因。龙源电力全年风电发电量约420亿~430亿千瓦时，受弃风影响的装机容量依然达到400多万千瓦，年限电损失高达上亿元。

其次，在辅助服务及加装储能系统等方面，风电企业要承担附加的额外成本。受制于土地、环保、林草等方面的政策规定，机位资源更加

珍贵，也影响到企业未来的开发布局。

最后，在竞价机制下，风电价格将随着火电基准电价上下浮动，但不同地区的火电基准电价差异很大，如新疆和云南的电价差额有的能达到 0.2 元 / 千瓦时。因此，除技术进步、降低开发和建设成本外，企业还必须考虑竞价市场、电力市场交易可能带来的损失。

在这种形势下，行业迫切需要消除影响收益的多重因素。同时，面对平价上网的要求，开发企业要综合评估，精打细算，才能做出最“划算”的决策。

开源，控制好影响发电量的因素

Q：平价上网时代，增加发电量成为风电项目追求利润的核心。针对影响发电量的因素，您认为，企业要着重做好哪些工作？

A：一是从源头上做好控制。设计选址关系到机组全生命周期的发电效率，相关工作要做得更加精细准确。此外，在风能资源较好的“三北”地区，后安装的大容量风电机组往往会将早期安装的小容量风电机组围在中间，严重影响后者的发电量。因此，在进行机位选址时，开发企业应增加协调机制，使机组之间拉开一定距离，避免因距离太近影响捕风效率，造成投资浪费。同时，呼吁行业出台相应的建设标准。

二是风电装备制造业的水平和产品的可靠性亟需提升。目前，虽然绝大多数风电设备都实现了国产化，但即便是在新建的风电项目上，叶片、齿轮箱、变桨系统、偏航系统、轴承、电机等设备的故障率依然较高。这主要是因为风电产业集中度不高，产业链较长，整体健康水平有待提高。

三是维护管理要跟得上，包括技术性维修是否到位，备用零部件能否设计相应的冗余，人员能力水平是否与产业发展相适应等。针对于此，数字化、智能化运维将发挥出日益显著的作用。从 2020 年开始，龙源电力将所有设备的基础数据、运行数据，以及维修人员的行为数据都上传到云平台，对设备和人员实行全面的技术监督与指导。通过采集、分析数据，及时发现问题并进行改进，开展设备故障预警、预知性状态检修等，效果非常明显。目前，该平台已经成为全球最大的风电生产管控数据接入平台。借助该平台，2020 年，在所属风电场的平均风速下降 0.1 米 / 秒的情况下，龙源电力的风电年利用小时数上升了 42 个小时，非计划性停机时间半年内下降了 86%。

最近，龙源电力联合金风科技、远景能源、上海电气、联合动力等 8 家风电机组制造企业，计划用 5 年时间，集中打造一批全年无故障示范风电场，力争到 2025 年全年无故障示范风电场的数量达到 10~20 座。事实上，这个目标定得还是挺高的。因为目前连续 3 个月无故障的机组数量只占全部机组的一半，更何况扩大到全年以及整座风电场。

未来，希望整机企业能够打破行业数据壁垒，与上下游形成数据交互，共同解决行业难题，促进技术进步。所有试图通过数据封闭，获取后服务市场超额利润的想法与做法，都是不可能长久的。

四是提高电网端的风功率预测精度。目前，功率预测均方根准确率在 90% 左右。下一步，我们将融入气象预测等数据，力争使调和平均数准确率达到 85% 以上。

Q：在运营管理中，龙源电力采用哪些标准对风电机组运行质量进行考核？有什么创新举措？

A：进入平价时代后，龙源电力对风电机组的运行提出了更高要求。一是尽量保障机组的可靠性，只要有风就应做到“应发必发”；二是要让机组始终处于最佳的运行状态，不断

左图：技术人员对风电机组液压站进行技改

右图：技术人员紧固风速仪

开展最佳功率曲线寻优，减少实发功率偏离；三是维护管理要到位，有缺陷及早发现，及时消缺。

在提高设备运行的可靠性上，龙源电力一方面依靠大数据平台，使信息更加透明，及早发现问题，缩短检查周期；另一方面，重新调配运检人员，使之与机组状态相匹配。过去，新旧设备的故障率差异很大，有些机型故障率居高不下，有的机型故障率低，运维人员忙闲不均。2020 年，龙源电力进行了风电场组织架构调整，实行运检分离，按省区调配优化不同层次的人员。对于问题较严重、故障率高的机组，集中人力一次性彻底解决。同时，通过团队作战，开展实战交流，提高运维人员的整体水平。实施这项措施之后，员工的平均劳动生产率提高了 26%，30 座风电场实现了无人值守。下一步，将实现维护人员的工作时长、质量与收入挂钩，进一步提高员工工作的积极性。

转变，需进一步完善体制机制

Q：为促进风电高质量发展，“十四五”期间，您认为从政策层面要做好哪些工作？

A：“十四五”期间，最主要的就是完善体制机制。

一是站在风电全产业角度，制定好相应的规划、政策。例如，2020 年 9 月发布的《关于＜关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见＞有关事项的补充通知》（财建〔2020〕426 号），为风电国家补贴规模设定上限，额度收了口，但并没有针对因外部消纳、内部技术条件等因素而无法达到限额电量的情况建立相应的疏导机制。

二是尽快出台老旧风电场改造的相关政策，并简化审批环节。对于行业普遍存在的存量机组的技改或替换，应尽快出台相应政策。明确在保持等容量风电场的基础上，原有的小容量风电机组可以更换为更大容量机组，从而提高风能资源利用率。但改造和更换机组的主动权应交给市场，由企业自行决定。

在“30 ·60 目标”的指引之下，风电产业的未来值得期待。“十四五”期间，龙源电力确立了新能源装机容量翻一番的目标。只要国家政策到位，相信风电产业的发展定会超过预期，助力我国更早地实现碳达峰、碳中和目标。当然，这也要求风电行业做出更大努力，在新能源领域保持领先地位。

鉴衡认证
CHINA GENERAL CERTIFICATION

NEKL WSTC

国家能源风能太阳能仿真与检测认证技术重点实验室
——风电机组风轮叶片检测中心

以先进设备、专业技术为风电设备检测提供高效优质服务

以鉴衡认证中心为依托单位的“国家能源风能太阳能仿真与检测认证技术重点实验室”，是我国风能太阳能行业集仿真技术、标准研究、检测认证技术研究和实践于一体的公共技术服务平台。

重点实验室设立的风电机组风轮叶片检测中心位于河北省保定市，占地36000平方米，拥有先进的实验检测设备，执行与国际接轨的实验检测标准，为叶片检测出具权威报告。

目前检测中心已完成多项叶片实验测试任务，可承接100米内叶片全尺寸结构试验、无损检测和叶片零部件测试项目。

地址：北京市东城区和平里北街6号远东文化园26楼3层　邮编：100013　电话：010-59796665
传真：010-64228215　网址：http://www.cgc.org.cn　邮箱：cgc@cgc.org.cn

扫一扫
鉴衡认证二维码

广告

海上风电
世界级实验平台投运了

本刊 | 薛辰

位于广东阳江的国家海上风电装备质量监督检验中心，是国内唯一国家级海上风电装备公共技术研发实验平台，也是迄今为止全球最大的叶片检测实验室。它可以开展 150 米级叶片全尺寸试验，表明中国风电叶片共性技术探索进入了“无人区”。

日前，一支长度达 102 米的风电叶片跋涉 2000 千米抵达广东阳江深水港口，随即被运到位于阳江的国家海上风电装备质量监督检验中心（下称“国家质检中心”）。一位迎接叶片进场的工程师告诉本刊记者，只有国家质检中心的叶片实验室才能完成这支全国最长叶片的全尺寸全项目试验，一份测试报告会决定它的未来命运。

国家质检中心由北京鉴衡认证中心（下称“鉴衡认证”）建设与运营，是国内唯一国家级海上风电装备公共技术研发实验平台，也是迄今为止全球最大的叶片检测实验室。一位不愿具名的资深专家向记者表示，“这家可以开展 150 米级叶片全尺寸试验的实验室的建成，表明中国风电叶片共性技术探索进入‘无人区’，试验和验证将为海上风电技术创新与发展提供基础支撑。”

国家质检中心的背后，是一个正在阳江崛起的世界级海上风电产业集群。该中心的建设和运行对阳江海上风电产业基地建设起到了支撑和拉动作用，不到 3 年时间，已有 6 家大型海上风电开发企业、17 家风电装备制造企业落户阳江。

“一个集研发设计、装备制造、检测认证、运营维护于一体的世界级海上风电全产业链基地和出运母港已在阳江基本形成。”阳江市市长温湛滨表示，“阳江将持续打造更具竞争力的营商环境，愿与各方共同打造世界级技术与产业创新平台，不但为阳江，更为中国海上风电高质量发展提供新技术、新动力。”

国家质检中心的叶片全尺寸实验室、整机实验室已于今年 1 月投入运行。温湛滨希望，尽快推进后续实验平台项目的建设，以支持海上风电共性技术研发创新与发展，助力中国海上风电高质量发展。

共性技术概念最早出现于 1988 年美国的 ATP（先进技术计划），布什政府将其定义为可以应用于多个产业的产品或工艺的科学事实，是对整个或多个产业形成瓶颈制约作用的技术。然而，共性技术的突破离不开公共实验平台的支持。

公共技术研发实验平台和设施，是一个国家技术创新和行业创新发展的重要基础，也是企业研发的重要工具。国际经验表明，企业自建实验

平台利用率太低，且成本投入高，经济性不好，单个公司难以建设顶级水准的技术研发实验平台。因此，不难理解为什么在欧美地区大多是由政府直接投资建设公共实验室平台，也有国家的政府和研究机构、企业共同投资建设顶级检验检测平台，以支持共性技术研发。比如，美国能源部资助南卡罗来纳州克莱姆森大学建设了 15MW 风电传动系统试验平台，服务于大容量风电机组研发过程中对机组、齿轮箱、发电机和传动系统的测试需求。

近几年，许多欧洲国家也在原来的基础上新建和扩建领先的实验平台与设施，催化共性技术研发与创新。例如，西班牙和英国等国家的可再生能源中心、丹麦 RISO 国家实验室建设的叶片、齿轮箱试验平台等，均有效支持了这些国家的海上风电发展。

相较于此，我国亟需尽快补齐在公共技术实验平台建设上的短板。

有专家建议，国家可将支持公共技术研发实验平台作为科技政策的一项重要内容，政府应通过系统规划，集中使用用于零散项目的分散资金，让有限的资金能够在具有战略意义的关键技术研发上发挥更大价值。同时，加快公共技术研发实验平台建设，可由第三方中立机构牵头，企业共同参与，采取以国家投资为主、企业筹资为辅的方式，建设行业亟需的研发实验平台和设施。

此外，专家还建议，应基于国家质检中心第三方运行模式，建立国家海上风电数据库，通过大数据挖掘平台将知识、失效模式、场景应用经验用于海上风电标准的制（修）订，以标准化的力量为海上风电全生命周期护航。

高质量发展海上风电是支撑我国能源转型战略的重大举措。中国工程院院士、原副院长，国家能源咨询专家委员会副主任杜祥琬建议，通过公共技术实验平台破解大功率关键部件的设计与制造瓶颈，推进海上风电装备产业链升级，满足市场对高质量、低成本供应链的刚需，助力中国海上风电走在世界强国前列。

国务院原参事、可再生能源专家石定寰认为，没有公共实验平台的支撑，无论是一个国家，还是一家企业，都难以产生原始技术创新。早在十年前，

石定寰就呼吁建设国家级公共检验检测实验平台，支持可再生能源的基础研究与创新。谈及当前的中国海上风电发展，石定寰希望国家在海上风电质量保障体系、公共基础设施平台建设上给予更多关注，通过共性技术研发推动风电创新发展。

中国空气动力研究与发展中心原总工程师贺德馨希望政府、机构、企业加强共建合作，加快传动链全尺寸地面试验平台和大功率部件测试实验室建设，满足 15MW 风电机组全尺寸多自由度试验需求，解决关键部件“卡脖子”技术难题。同时，要对大型海上风电机组型式试验与监测平台建设进行规划和部署，做到以数据为依据、以结果为导向，为海上风电基础研究与创新赋能，促进我国海上风电高质量发展。

尽管我国风电公共技术研发实验平台发展滞后，但也不乏亮点。国家认证认可监督管理委员会（下称“国家认监委”）通过认证认可制度推进可再生能源公共技术实验平台建设，以支持共性技术研发，促进行业基础技术进步和创新发展。

2018 年 6 月，国家认监委批准鉴衡认证在广东阳江建设与运营国家质检中心。有知情专家透露，国家认监委和阳江市政府举荐鉴衡认证来建设和运营国家质检中心，是看好鉴衡认证的基本面和专业性。

看科研项目，鉴衡认证主持和参与了国家级科研项目 38 项，其中，国家 863 计划项目 12 个、国家科技支撑项目 9 个、国家科技攻关项目 1 个，国际合作课题 27 项；看标准制定，鉴衡认证牵头或参与制定了 27 项国际标准、63 项国家和行业标准，自主研发技术规范 100 余项；看技术专利，鉴衡认证在风电和光伏领域拥有 27 项专利，11 项软件著作权；看国际化程度，鉴衡认证颁发的机组产品认证证书获得全球市场采信，助力中国风电设备成功销往全球 20 多个国家和地区。

据了解，鉴衡认证自 2007 年颁发我国首张风电机组产品认证证书以来，一直致力于国家公共研发实验平台的建设，成为行业内首家既具备风电机组认证资质，又拥有国家级检验检测实验平台的机构，行业前行的每一步，都有鉴衡认证检验检测的身影。

2010 年，鉴衡认证在河北保定建成首个叶片检测中心，能够完成长度 100 米叶片的全尺寸测试。

这家当时亚洲最大的叶片实验室，将测试验证得来的知识和数据固化到叶片认证实施规则文件中，通过认证持续改进过程提升叶片设计性能和制造可靠性。

里程碑事件发生在 2011 年。

是年 9 月，国家能源局正式批复依托鉴衡认证成立国家能源风能太阳能仿真与检测认证技术重点实验室，为行业技术进步和自主创新提供基础服务。

这一年，鉴衡认证完成了大型风力发电机组仿真平台系统性能优化，能够更精准地评估机组与风能资源的适应性、机组与零部件载荷计算及其强度校核建模更接近机组的真实运行场景，这也进一步提升了风力发电机、齿轮箱、变流器等关键零部件检测与认证的技术能力。

“为建设好国家重点实验室，十年来，鉴衡认证在资金投入上倾其所能。”鉴衡认证副总裁张宇介绍说，通过移动检测设备，鉴衡认证不但能够开展风电机组并网性能测试，还可以进行机械载荷、功率特性、噪声等方面的测试，提升机组并网性能和安全性。

同在河北，鉴衡认证张北 50MW 国家风电装备检测实验平台（下称“实验风电场”）已于 2021 年年初建成投运。该平台设置 9 个 6~9MW 整机测试机位，可基于 IEC 标准要求开展载荷、功率曲线、噪声、电能质量等全项整机测试。

据统计，仅 2013 年至 2020 年的 8 年间，鉴衡认证通过保定叶片中心完成了 100 多款叶片型式试验，是国内检测叶片最多的实验室。到 2021 年 3 月，鉴衡认证完成机组型式试验 120 多款、在役机组检验超过 7000 台，机型遍布全国 30 个省（直辖市、自治区），覆盖高原、草原、沙漠、戈壁、山区、平原、海上等各类工况环境，是国内完成检验检测最多、现场经验最丰富的检测机构。

从保定国家能源重点实验室到阳江国家质检中心，鉴衡认证已成为风电检验检测技术领域的风向标。谈及叶片全尺寸实验室项目设计，张宇告诉记者，鉴衡认证的叶片专家首先要做的是，结合叶片长度、质量、载荷等因素，构建基于叶片关键参数的预期评估模型，再对 150 米级风电叶片的设计与试验参数进行预判，为项目的强度设计提供依据。

就工程建设而言，国家质检中心的叶片试验承台是国内单体最大的风电承台项目，被称为“7.3 万平米毫米级精度工程”。建筑爱好者对“承台基础 1274 根的桩基”很有兴趣，这几乎是北京国贸大厦主楼桩基数量的 3 倍。“这是测试能力建设的刚性要求。”张宇解释说，试验承台采用全自动 8 点协同加载系统，也可根据测试需求将加载点数量扩展到 12 点。仅单点加载载荷可达 60 吨，那么，试验承台的承载力需要达到 200000kNm，近似于 2 万吨吊机的起吊能力，相当于用 10 米的杠杆翘起 408 头成年大象。

据了解，试验承载平台的连接部分采用对穿连接的预埋法兰设计。预埋法兰为 8.5 米 ×8.5 米，由 4 块钢板拼装而成，浇筑后法兰平整度误差低于 1 毫米，垂直度偏差不超过 0.05 度，即法兰在 1 米高度范围内的位置度偏差与 10 根头发的直径相当。

张宇透露，国家质检中心叶片实验室全自动静力加载系统采用 BP 神经网络 PID 控制算法，可在线实时调整 PID 控制器参数。与传统测试相比，测试载荷与设计载荷的偏差由 10% 降低为 4%，加载偏差由 1.5% 降低为 0.5%，试验综合偏差降低 7%，检测精度达到全球领先水平。

谈到叶片疲劳试验，张宇强调，国家质检中心叶片实验室采用共振激励系统，通过偏心质量的旋转使叶片产生共振，进而达到叶片的疲劳试验载荷要求，且在疲劳试验过程中准确监测叶片应变的变化，保证叶片试验过程中试验数据的准确有效。他还透露，“鉴衡认证研制的多点疲劳和双轴疲劳激振系统，能够实现叶片挥舞、摆振方向的耦合疲劳测试，真实再现风电叶片在运行中的受载情况，并且可缩短检测周期 30% 以上，加速叶片产品市场化进程。”

锐电科技：将老旧机组年利用小时数提至3000小时

本刊 | 王芳

历经数十年发展，我国风电市场格局和技术产品发生了巨大变化，产业已经步入成熟期。面对不断出现的新技术，那些屹立于优质风能资源区的早期投用风电机组，其运行状况和发电效率都有待提升。锐电科技有限公司（下称“锐电科技”）致力于全面提高老旧机组的安全性和经济性，通过二次开发挖掘资源潜能，为客户创造出更高的发电收益。同时，基于大量的实践经验，将存量风电场的年利用小时数从 2000 小时左右，提高至接近甚至超过 3000 小时，使之媲美新建项目。这份雄心从何而来？近日，本刊记者采访了锐电科技总经理辛理夫、副总经理汪锋，他们或许能给读者一个答案。

老旧机组改造的时机来了

今年 2 月 26 日，国家能源局在《关于 2021 年风电、光伏发电开发建设有关事项的通知（征求

意见稿）》中提出，“遵循企业自愿原则，鼓励业主单位通过技改、置换等方式，重点开展单机容量小于 1.5 兆瓦的风电机组技改升级。”这标志着从“十四五”开始，全国老旧风电机组的技改升级将全面启动。

辛理夫告诉记者：“基于生态文明建设和可持续发展的宏远目标，这既是对新能源特别是老旧机组升级改造的支持政策，也是对国家‘30·60 目标’的具体呼应。老旧机组的改造将提高对优质风能资源的利用效率，为存量资产提质增效、合理延寿；进一步放大存量资产的效益，促进新能源上网和消纳的良性循环。”

据统计，2000 年（不含）以来，单机容量为 1.5 兆瓦（含）以下的机组累计装机容量接近 1 亿千瓦，规模相当可观。辛理夫解释说，这些存量资产在其剩余生命周期内的价值就是稳定高效地发电，但受周边项目的大规模开发、设备部件性能下降等不利因素的影响，原有风电场出力大部分达不到可研要求，造成老旧项目的效益不高。而新建风电场实现平价后，业主对老旧项目的提质增效需求大增。此外，对于那些尚处于寿命期、运行状态良好的老旧机组，若全部“以大代小”，将造成投资浪费，加重企业负担，同时产生大量固废，与生态文明建设目标不符。

事实上，老旧风电场往往享有更高的上网电价，通过合理的技改能够提高利用小时数，创造出更高的全生命周期收益，从而加快收回项目投资，扩大盈利区间。同时，借助技改措施可以一定程度上解决零部件国产化初期，因存在设计和生产缺陷导致的机组故障率较高的问题。反之，若任由部件老化，风电场运营会存在较大的安全隐患，造成对社会资源的极大浪费。

探索技改的成熟解决方案

锐电科技是华锐风电科技（集团）股份有限公司于 2016 年 1 月成立的全资子公司。华锐风电深度参与过我国的早期风电场开发，目前市场上有近万台该公司制造的风电机组，这些都成为锐电科技进行技改的对象。通过对不同环境下以及不同类型的机组进行改造，锐电科技积累了大量一手资料与丰富的实战经验，并根据共性和特性问题，形成多个系统性技改方案。

据辛理夫介绍，风电场改造主要分为三个层次：一是基于多年的故障数据分析和成熟技改方案，解决风电机组的安全性和可靠性问题，提高设备的可利用率，打造无故障风电场。二是通过对风电机组的二次开发，解决其发电性能问题。例如，结合叶片的定制化开发、载荷控制策略的反复迭代、控制系统的优化设计等，形成锐电科技的二次开发方案；对部分机位点选择不合理的风电机组，采取移机组合二次开发方案，让机组重获新生。三是对风电场进行智能化方面的二次开发。通过健康管理技术、数字化技术、智能调度管理技术等提高风电场信息安全性，形成智能运维的综合解决方案。在此基础上，锐电科技还开发出智慧风电场云平台，包括远程的集中监控和管理系统、数字化车间系统和智慧风电场综合信息管理系统以及 PHM 云平台类产品等。

此外，该公司还将服务向上下游延伸。汪锋向记者介绍说：“在上游，主要针对上述三个改造目标不断深化产品质量；在下游，参与电力交易过程中高精度预测系统的开发，联合科研院所参与后端项目的推进和产品开发，包括针对电力市场交易层面提供更加具有延展性的产品和服务，形成立体化的服务格局，做管家式的优质服务提供商。”

被实践验证的才有生命力

依托华锐风电设计院长期不懈的研究，这些系统性解决方案凝结了华锐风电多年的

风电设计和运行经验，融入了其十多年的技术创新积淀，并经过实践验证具有显著效果，这也是锐电科技产品的生命力所在。

据悉，其风电机组二次开发产品设计方案已通过知名认证机构的认证。其中，2020 年 9 月发布的 SL1590Plus 机组新产品，在张家口博德玉龙风电场的技改样机顺利投运，后续小批量实施效果得到了客户的好评，这表明锐电科技在对存量 SL1500 机组进行二次开发上取得突破。针对应用 1.5 兆瓦机组的风电场，该方案的投资回收期一般为 2~4 年。由于是系统定制化技改方案，与传统叶片延长能提升 5%~8% 的发电量相比，锐电科技的二次开发可以将发电效益提升约 20%~40%，对于未满 20 年寿命期的存量风电机组而言，总收益有望显著提高。

系统性的技术改造同样优化了风电机组的运维方式。早期的运维方式通常为“故障消缺 + 定检维护”，容易导致较长时间的停机。现在，采用基于风电机组健康管理的运维模式，能够及时发现设备存在的问题，相应改变维护策略，可以将机组“缺陷”消除在“萌芽阶段”。

同时，数字化和信息化技术也将风电场的管理模式从就地推向了远程，以集控中心的模式开展日常运维工作，借助大数据技术进行多场站运行效果分析，通过自动化方式完成定检巡检工作等。例如，锐电科技推出的“锐智”健康管理系统集成了整机、机械、电气、子系统状态检测、状态评估和故障预警功能，能够提前预判机组状态，为运维提供方案和建议，配合健康管理的精细化运维，能够让风电机组少报或不报故障。

“我们的目标是3000小时”

随着存量风电市场的不断扩大，竞争持续加剧，服务内容逐渐分化。在技术领域不断深耕的专业企业将占据高端技改服务市场，成为第一梯队。

“我们的目标是通过锐电科技的优势方案，将存量风电场的年利用小时数从接近 2000 小时，提升至接近甚至超过 3000 小时，这样可以媲美新建风电场的容量系数。”辛理夫胸有成竹地说。

能有如此信心，离不开人才与制度。锐电科技拥有众多从事风电技术开发超过 10 年的高级工程师，覆盖风能资源、载荷计算和优化、机械传动、自动控制和模式识别、软件算法、系统仿真等专业。辛理夫将他们视作企业的“核心竞争力”。此外，加大研发投入更是必不可少。锐电科技将每年利润中的 30% 用于新产品开发，这是许多其他企业难以做到的。

走向平价后，更高效的技术、更全面的解决方案，抬高了运维团队的准入门槛，服务企业、开发商、整机制造商之间的运营合作模式也在不断创新升级，将形成更为优化的生态。

辛理夫表示，开发商会同专业运维服务商签订 3 年甚至更长期的服务合同，如保电量合同、综合解决方案的设计合同等，避免频繁更换运维服务商；发电企业和整机制造商的联系将更加紧密，主流整机制造商都在出质保机组的升级改造方面做了非常多的努力和探索，这些将推动相关技术和产品的升级；引进社会资本参与项目的融资建设，解决开发商的资金来源问题，或者采用合同能源管理模式，减少前期资本金投入；增加对赌条款和承诺，通过持续的服务消除开发商的顾虑等。

“二次开发不单是技改，而是相当于一次高效的投资。”辛理夫认为。

未来，通过二次开发，风电产业有望实现更高质量的发展。“将年发电小时数提高至 3000 小时”，助力“打造全年无故障风电场”等目标的提出，无不彰显出锐电科技在运维市场中对自己的严格要求。

WIND ENERGY

A COVERAGE OF ALL EXCELLENCE OF WIND

传播专业知识 启迪成长智慧

www.fengneng.org.cn

扫一扫，关注风能专委会官方微信
轻松阅读杂志精华文章

風能 WIND ENERGY 杂志

地址：北京市东城区和平里北街6号远东文化园26楼3层
电话：010-59796665-3953(编辑部)
010-64405232-3501(广告部)
传真：010-64228215　　邮编：100013
投稿邮箱：gaojian@cwea.org.cn

广告

2020年欧洲新增风电装机14.7GW

编译 | 夏云峰

2 月 25 日，欧洲风能协会（WindEurope）发布《欧洲风能——2020 年统计与未来五年展望》（*Wind energy in Europe-2020 Statistics and the outlook for 2021–2025*）报告。

报告显示，2020 年，欧洲地区新增风电装机 14.7GW，较 2019 年下降 6%，比新冠肺炎疫情爆发前预测的水平低 19%。截至 2020 年年底，欧洲风电累计装机容量达到 220GW。

报告指出，按照目前各国的规划，预计 2021–2025 年欧洲将新增风电装机 105GW，陆上风电占 70% 以上。然而，若不尽快采取行动简化审批流程，未来五年的新增装机容量将不足 80GW。

2020年发展情况

一、装机容量

2020 年，新冠肺炎疫情扰乱了供应链的正常生产秩序，限制了人员与货物的流动，迫使不少新建项目延期并网，导致欧洲风电新增装机容量降至 14.7GW，为历史第三高。2017 年的装机规模创下有史以来的最高纪录；2019 年同样表现强劲，居于第二。

由于全年有 0.4GW 的老旧机组退役，因此，2020 年欧洲风电的净新增装机容量为 14.3GW。

其中，陆上风电新增装机 11.8GW，占全部新增装机的 80.3%，比新冠肺炎疫情爆发前的预测值低了 22%。海上风电新增装机 2.9GW，占全部新增装机的 19.7%，接近于此前的预测值。

在全部新增装机容量中，欧盟合计占 71%，为 10.5GW。在非欧盟国家中，挪威、土耳其以及俄罗斯的增速较为明显。

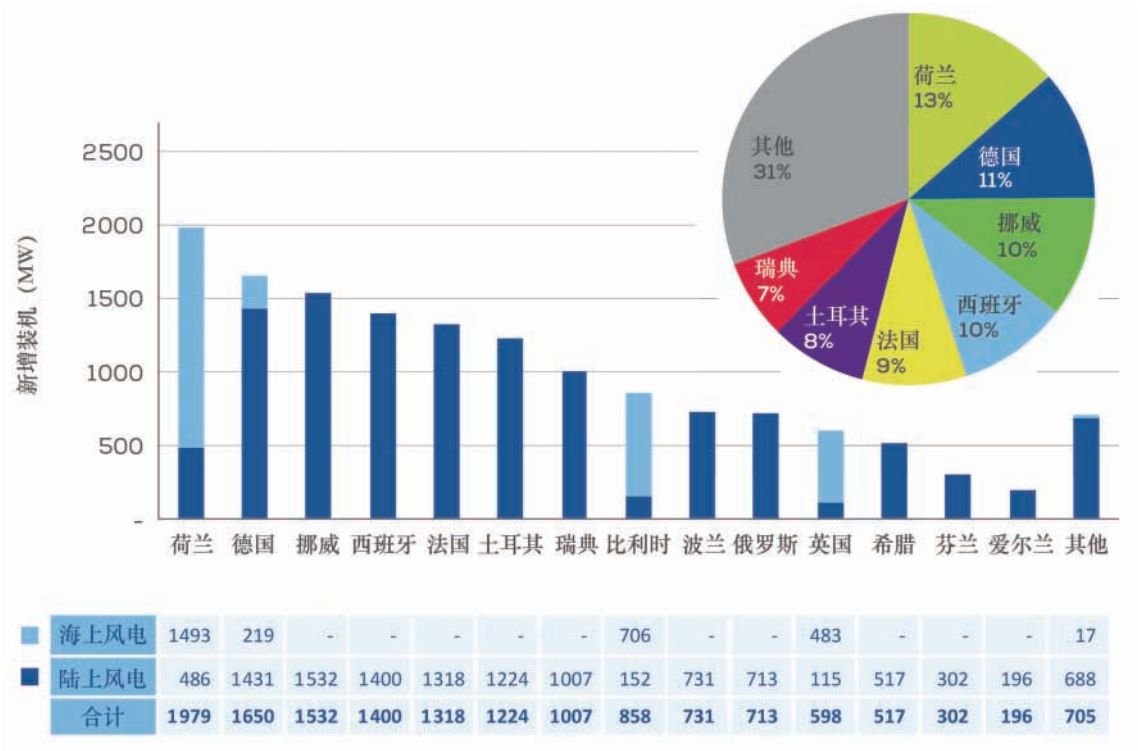
分国别来看，荷兰是 2020 年欧洲地区新增风电装机最多的国家，接近 2GW，创下该国的历史新高。海上风电装机容量占 75%，这主要得益于 Borssele Wind Farm 项目的完工。它由 3 座海上风电场组成，几个财团在 2016 年与 2017 年获得了项目的开发权。

德国风电新增装机容量的增速处于自 2010 年以来的最低水平。其中，陆上风电新增装机略超 1.4GW，海上风电新增装机 0.2GW 左右。

挪威的风电新增装机容量超过 1.5GW，全部来自陆上风电，达到创纪录的水平。2020 年上半年，封境措施致使该国风电开发活动受到强烈冲击，好在下半年得到恢复。

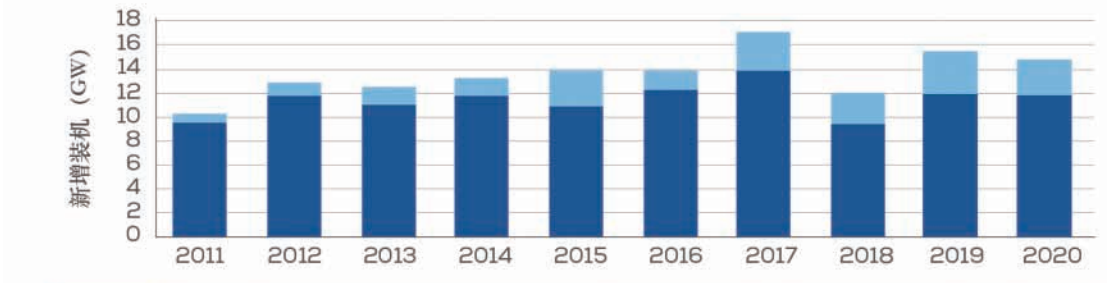
截至 2020 年年底，欧洲风电累计装机容量为 220GW，海上风电占 11%。欧盟的风电累计装机容量达到 179GW，其在欧洲海上风电装机中占 58%。

从各国来看，德国依然是欧洲地区最大的风电市场，紧随其后的是西班牙、英国、法国、意大利。瑞典、土耳其、荷兰、波兰、丹麦、葡萄牙等六国的风电累计装机容量均超过 5GW。此外，还有 5 个国家（比利



	荷兰	德国	挪威	西班牙	法国	土耳其	瑞典	比利时	波兰	俄罗斯	英国	希腊	芬兰	爱尔兰	其他
海上风电	1493	219	-	-	-	-	-	706	-	-	483	-	-	-	17
陆上风电	486	1431	1532	1400	1318	1224	1007	152	731	713	115	517	302	196	688
合计	1979	1650	1532	1400	1318	1224	1007	858	731	713	598	517	302	196	705

图1 2020年欧洲各国陆上风电与海上风电新增装机容量



	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
海上风电	0.8	1.2	1.5	1.5	3.0	1.6	3.2	2.7	3.6	2.9
陆上风电	9.5	11.7	11.0	11.7	10.9	12.3	13.9	9.4	12.0	11.8
合计	10.3	12.9	12.6	13.2	13.9	13.8	17.1	12.1	15.6	14.7

图2 2011—2020年欧洲陆上风电与海上风电新增装机走势

时、爱尔兰、希腊、奥地利和罗马尼亚）的风电累计装机容量突破了 3GW。

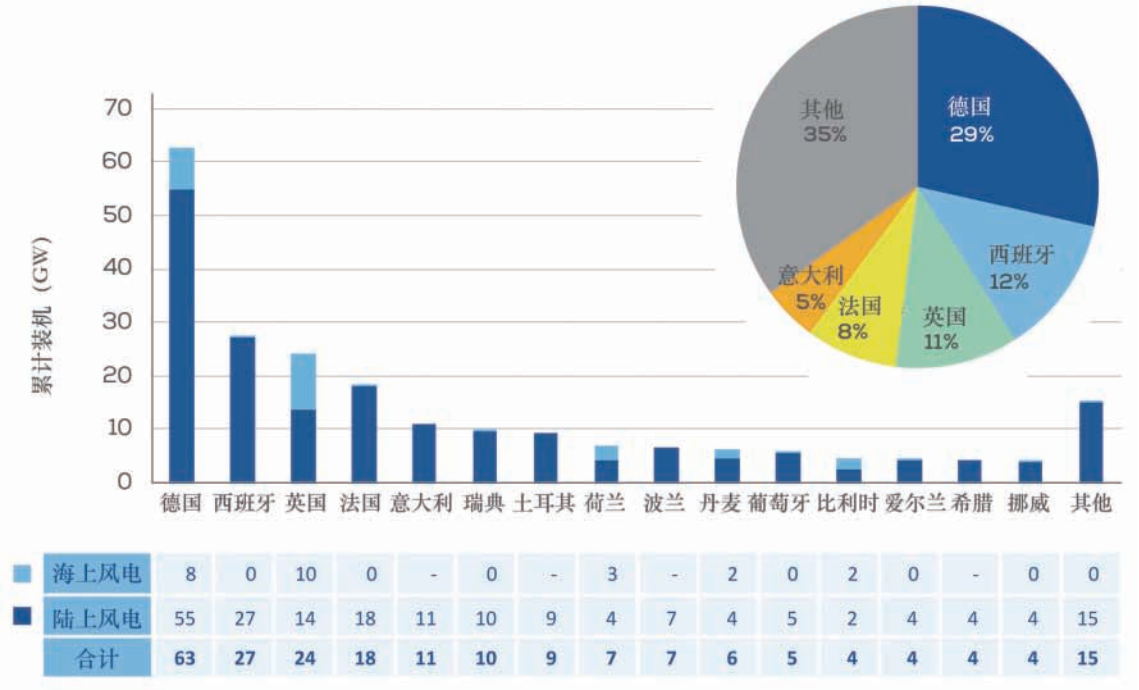
二、退役与换新

2020 年，欧洲地区共有 389.3MW 的风电装机退役，全部来自陆上风电，包括德国的 222MW、奥地利的 64MW、丹麦的 61MW、比利时的 25MW、法国的 15MW、卢森堡的 2MW 以及英国的 0.3MW。

全年，欧洲地区的风电换新装机容量为 345MW，主要来自德国，希腊、卢森堡与英国也有小规模换新。目前，

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
海上风电	4	5	7	8	11	13	16	18	22	25
陆上风电	94	105	116	127	137	149	162	171	183	195
合计	**98**	**110**	**123**	**135**	**148**	**162**	**178**	**189**	**205**	**220**

图3 2011—2020年欧洲风电累计装机容量走势



	德国	西班牙	英国	法国	意大利	瑞典	土耳其	荷兰	波兰	丹麦	葡萄牙	比利时	爱尔兰	希腊	挪威	其他
海上风电	8	0	10	0	-	0	-	3	-	2	0	2	0	-	0	0
陆上风电	55	27	14	18	11	10	9	4	7	4	5	2	4	4	4	15
合计	**63**	**27**	**24**	**18**	**11**	**10**	**9**	**7**	**7**	**6**	**5**	**4**	**4**	**4**	**4**	**15**

图4 截至2020年欧洲各国的风电累计装机容量

这方面的制约因素主要是审批程序过于繁琐。

三、机组配置

2020 年，欧洲各国新安装风电机组的配置差异十分明显。芬兰在陆上风电中再次拔得头筹，平均单机容量达到 4.5MW；英国则最小，仅为 2.2MW。基于已获得的十六国数据来计算，陆上风电机组的加权平均单机容量为 3.3MW。

全年，新安装海上风电机组的平均单机容量为 8.2MW，高于 2019 年的 7.2MW。其中，荷兰与比利时均达到 8.7MW，领跑欧洲。

四、发电表现

2020 年，得益于强劲的装机、风速偏高（尤其是 2 月和 3 月），以及第一波新冠肺炎疫情爆发后各国采取封境措施导致的电力需求急剧下降，欧盟与英国的风电装机共发电 458TWh，满足了 16.4% 的电力需求（陆上风电为 13.4%，海上风电为 3%），较上一年提高 1.4%。2 月的风电表现更是达到历史最佳，共满足 24% 的月度电力需求，且创造出全年最高的单日风电发电量（2760GWh），相当于全天 60% 的时间内所有风电机组处于满发状态。

从 2020 年欧洲各国风电所满足的电力需求比重来看，丹麦最高，为 48%；爱尔兰（38%）和德国（27%）紧随其后；英国、葡萄牙与西班牙分别为 27%、25%、22%。共有 14 个欧盟成员国超过了 10%。

2020 年，欧洲风电保持着稳定的产出。2 月 10 日，单日风电出力达到全年最高的 116GW。

全年，欧洲全部风电机组的平均容量系数（capacity factor）达到 27%，较 2019 年提高 2%。其中，陆上风电为 25%，海上风电为 42%。如果仅考虑新投运的项目，这一指标将大幅提升，陆上风电项目高达 40%，海上风电项目则为 60%。

风电出力处于波动之中，并且全年的走势十分明显。2 月，欧洲风电的平均每小时出力达到全年最高水平。在全月 90% 的时间里，欧盟与英国的风电每小时出力都超过了 55GW，基本相当于同期德国的每小时电力需求。

5 月至 8 月，风电的每小时出力变化有所减缓，平均出力也较低。这也在预料之中，因为夏季那几个月欧洲地区的风速通常偏低。

与夏季相比，虽然冬季欧洲地区风电的每小时出力波动更大，但出力也处于最高水平，尤其是 1 月至 3 月。

五、招投标

2020 年，在 7 个欧洲国家举行的可再生能源拍卖中，风电中标容量合计超过 8.1GW，包括陆上风电的 7.4GW 和海上风电的 759MW。除了立陶宛和斯洛伐克，其他国家都已经

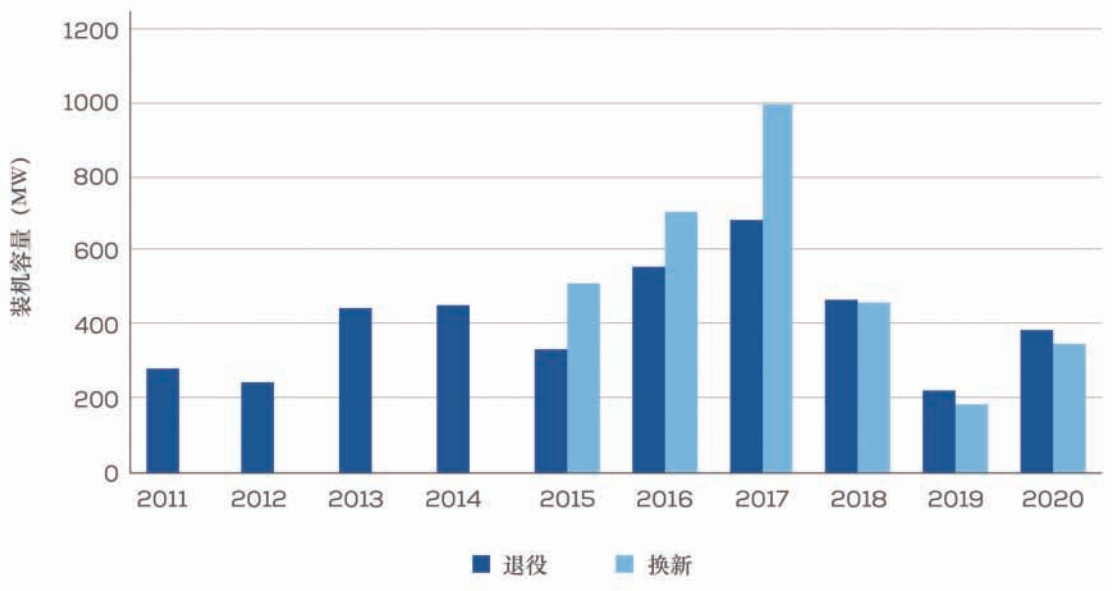


图5 2011—2020年欧洲退役与换新的风电装机容量

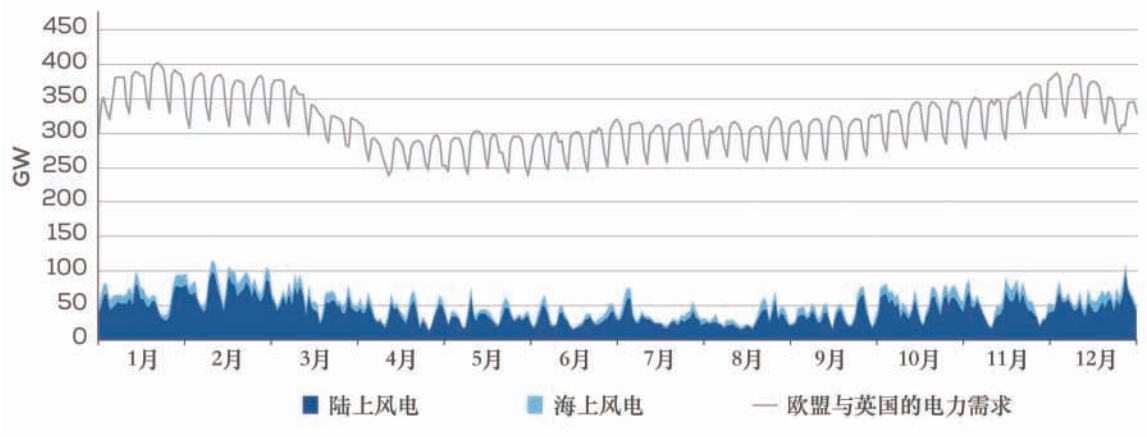


图6 2020年欧洲电力需求与风电出力逐月变化情况

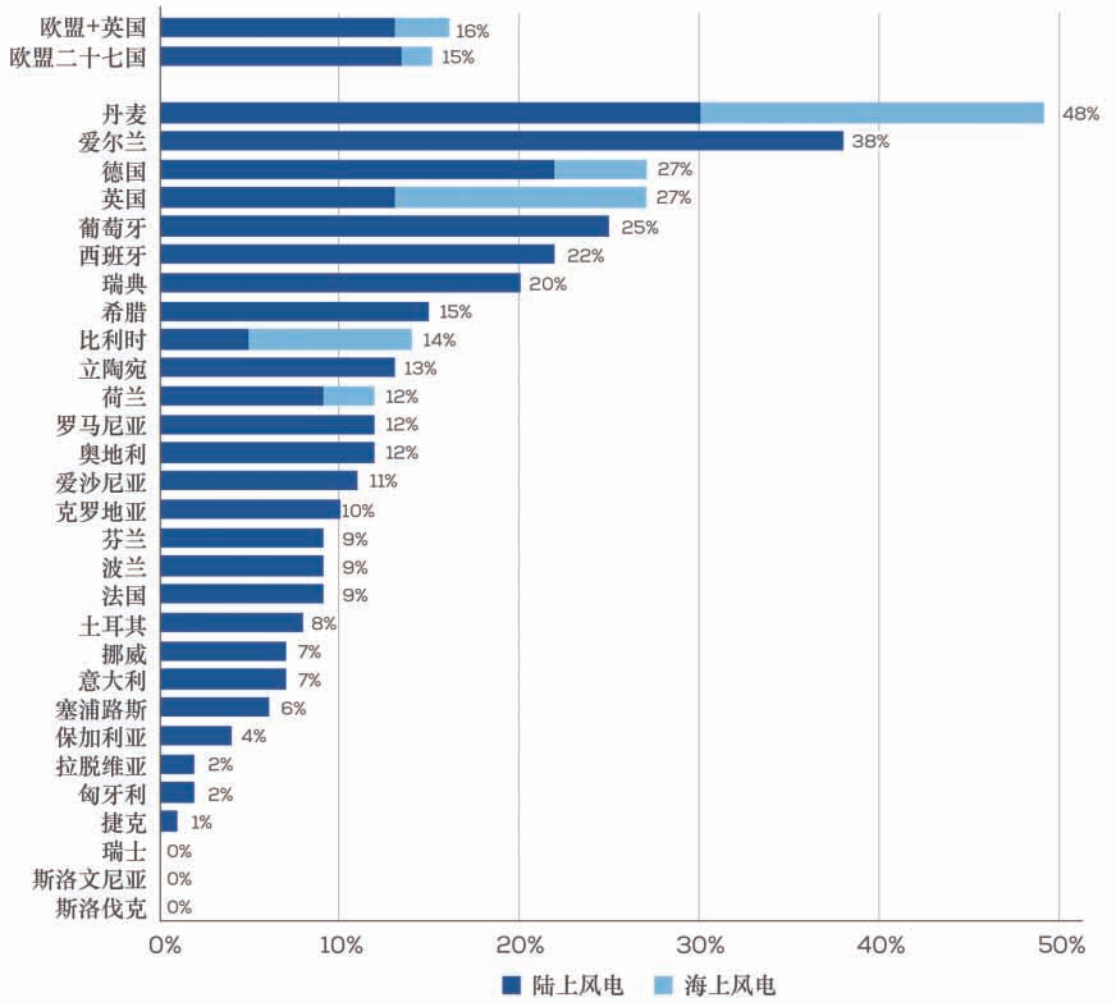


图7 2020年欧洲各国风电发电量在总发电量中的占比

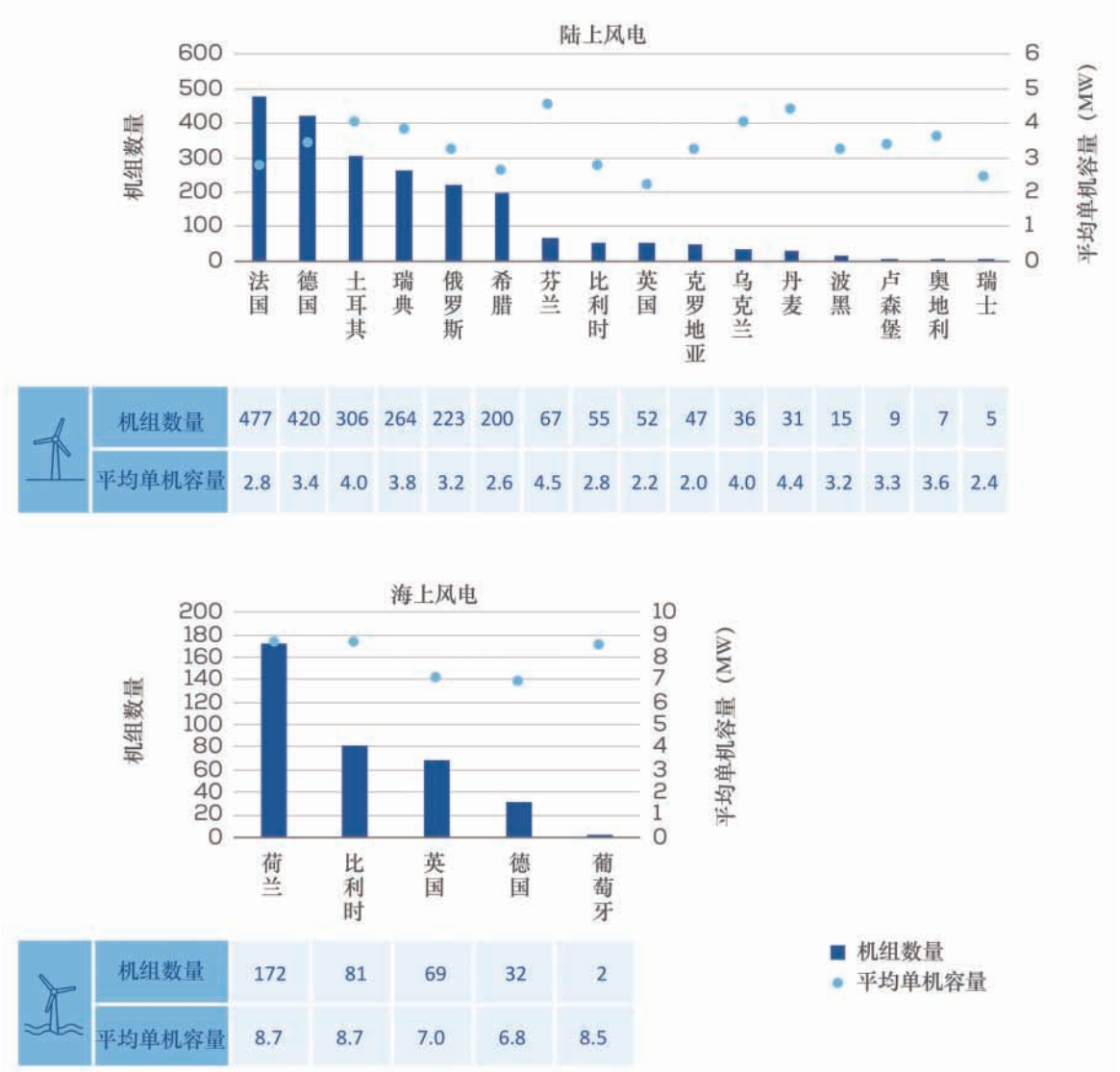


图8 2020年欧洲各国新安装的机组数量与平均单机容量

完成了各自的招标计划。

考虑到各国的支持机制、拍卖周期（auction lengths）、市场成熟度等方面差异性大，因此，很难对这些拍卖结果进行比较。

德国全年举行了7轮陆上风电拍卖，其中的6轮均认购不足。由于核准的项目数量不足，计划拍卖的3.9GW装机，最终仅中标了2.7GW。

因审批进度缓慢，意大利于2020年举行的3轮风电与太阳能光伏拍卖全部认购不足。这种低效率，意味着项目开发企业需要等待数年时间才能拿到政府规划部门的审批结果，2021年的拍卖势必也会因此面临着认购不足的问题。

2021—2025年展望

报告基于两种情景，预测了未来五年欧洲风电发展趋势。

现实预期情景（Realistic Expectations Scenario）综合考虑了欧洲各国的风电项目规划、拍卖与投标结果、正在推进的立法与

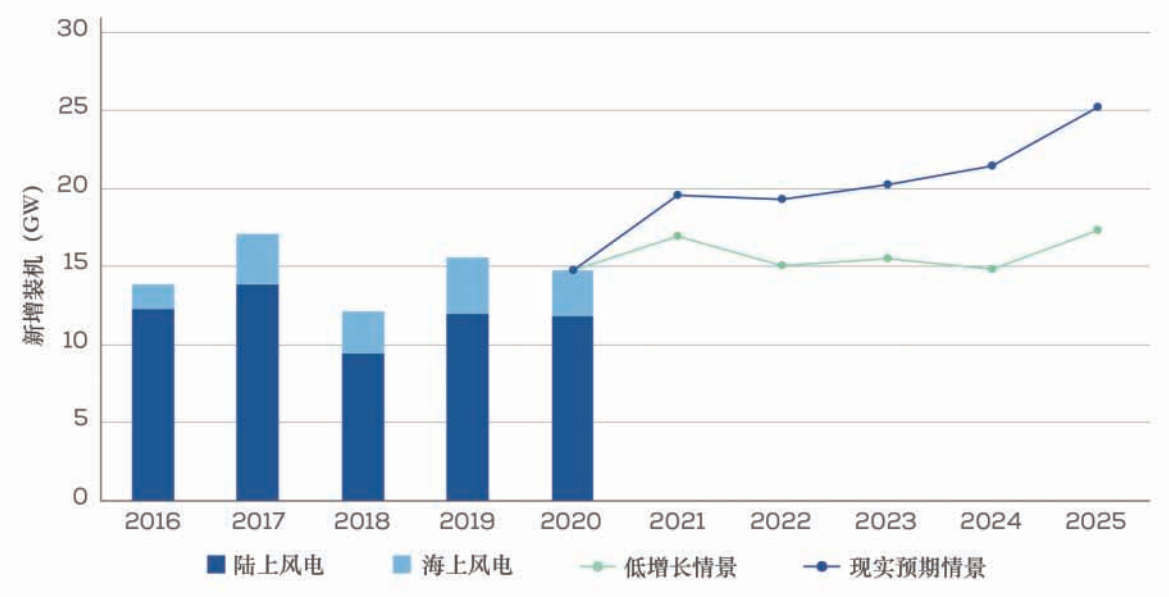


图9 未来五年不同情景下的欧洲风电净新增装机走势预测

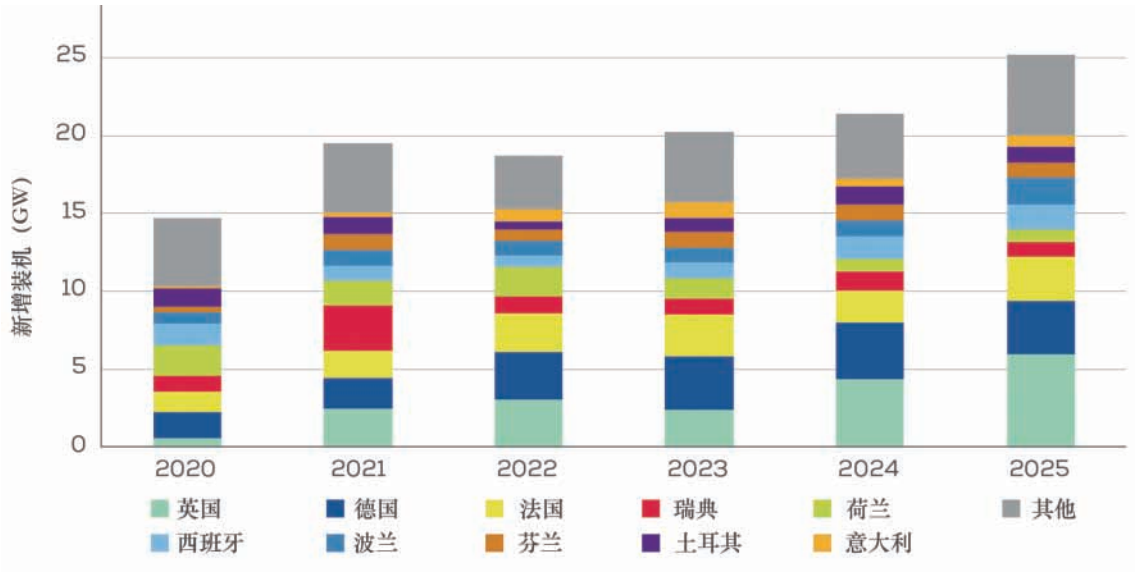


图10 现实预期情景下未来五年欧洲各国的风电新增装机走势预测

监管调整，包括与国家能源和气候计划（NECP）相关的拟议目标、长期的国家目标以及拍卖时间表。具体到海上风电而言，现实预期情景假定所有已中标的项目都将按期开发。在此情景下，到2025年欧洲风电累计装机容量将达到318GW，年均新增21GW。期间，欧盟的风电装机容量年均新增15GW。而要落实国家能源和气候计划（NECP）以及到2030年使可再生能源占比达到32%的目标，未来五年这些国家的风电年均新增装

机容量不能低于 18GW。

低增长情景（Low Scenario）则假定欧洲国家接下来没有解决好审批问题，也未能针对老旧机组换新以及因新冠肺炎疫情导致的货物与人员流动受限采取有效措施。在此情景下，到 2025 年欧洲风电累计装机容量预计只有 292GW，年均新增 16GW。

一、2021，创纪录的一年

2021 年，欧洲陆上风电与海上风电新增装机容量有可能再创新高。原因在于，受新冠肺炎疫情的影响，部分计划于 2020 年交付的项目被迫延期至 2021 年，这在陆上风电项目中表现得尤为明显。在现实预期情景下，2021 年瑞典有望新增风电装机 2.9GW，位居欧洲各国之首。

全年，欧洲预计新增海上风电装机 3.7GW，英国独占 2GW，其他装机分布在荷兰、丹麦与法国。

2018–2020 年，德国核准和中标的风电装机容量接近 4.5GW，据此预估，2021 年该国风电新增装机容量可能会达到 2GW，成为欧洲第三大风电市场。

法国有望新增风电装机 1.7GW，居第四位。其装机主要来自陆上风电（1.5GW），但随着第一个商业化项目的机组陆续投运，法国海上风电的发展也将迎来突破，新增装机约 240MW。这些项目是在 2012 年中标的，已经经历了长时间的延期。

此外，新增装机容量不低于 1GW 的国家还包括荷兰（1.6GW）、土耳其（1.1GW）、挪威（1.1GW）、西班牙（1GW）、波兰（1GW）和芬兰（1GW）。

然而，如果 2021 年仍然无法摆脱新冠肺炎疫情的侵扰，全年欧洲风电新增装机容量预计会低于 2.6GW，这将是我们在低增长情景下所看到的情形。

二、现实预期情景

在现实预期情景下，到 2025 年，欧洲的风电累计装机容量将增至 318GW，德国以 75GW 居于第一，其后是英国（42GW）、西班牙（31GW）、法国（30GW），瑞典、土耳其、意大利、荷兰与波兰也突破了 10GW。

2021–2025 年，欧洲将新增陆上风电装机 76GW，年均新增 15GW。

欧盟贡献出 65GW 的装机，年均新增 12.4GW，接近于国家能源和气候计划（NECP）中设定的目标（年均新增 12.8GW）。

德国将占 17%，新增装机 13GW；紧随其后的是法国（8.8GW）、瑞典（7GW）、西班牙（5.7GW）、波兰（5GW），还有 13 个国家同样超过了 1GW。

最近，西班牙公布了该国未来五年的可再生能源拍卖时间表，预计风电装机不少于 8.5GW。第一轮拍卖原计划安排在 2020 年 12 月，但直到 2021 年 1 月才举行，最终有 1GW 的风电项目中标。值得注意的是，这是西班牙首次在风电领域采用差价合约（CfD）机制。此轮中标的项目有望在 2023 年至 2024 年投运。2021 年 12 月，西班牙还将拍卖 1.5GW 的项目，其中的多数装机将在 2024 年至 2025 年投运。

在现实预期情景下，未来五年欧洲将新增海上风电装机 29GW，年均新增 6GW。

其中的一半装机来自英国，接近 15GW。装机规模较大的国家还包括荷兰（4.4GW）、德国（3.1GW）、法国（3GW）、丹麦（1.9GW）与波兰（0.7GW）。挪威、比利时、意大利、西班牙、瑞典的装机均超过 100MW。爱尔兰则仅有一个小型项目在 2023 年实现并网。

从远期来看，欧洲海上风电发展的前景是非常乐观的。此前发布的《海上可再生能源战略》（*Offshore Renewable Energy Strategy*），围绕到 2050 年使欧盟海上风电累计装机容量达到 300GW 的目标，提出了立法与非立法层面的建议。加上英国和挪威设定的目标，2050 年欧洲海上风电累计装机容量有望超过 400GW。

但面向 2030 年，欧洲的政策制定者仍有大量的工作需要去做。为实现到 2030 年使海上风电累计装机容量达到 111GW，年新增装机必须从目前的 3GW，提高到 2026 年的 11GW，且此后不能低于这一增速。为此，欧洲需要制定清晰的、基于差价合约机制的拍卖时间表。

三、低增长情景

在低增长情景下，2025 年欧洲风电累计装机容量将达到 292GW，年均增长 16GW。

短期的最大风险来自陆上风电，在 2021 年实现增长后，到 2024 年，欧洲陆上风电新增装机容量或降至不足 10GW，接近 2018 年的水平。

由于此前规划的项目无法如期投运，接下来欧洲海上风电新增装机容量预计将下滑，与现实预期情景相比，未来五年的新增装机可能会减少 5GW。

海风
列国志

顾晓明，于东南大学土木工程学院完成本科学业，随后在新加坡南洋理工大学获得结构工程博士学位，现供职于挪威海洋工程总包行业。其在挪威从事能源及海洋工程设计和总包工作超过十年，对欧洲各国海上风电发展情况较为熟悉。

“日不落帝国”的海上风电新野望

文 | 顾晓明

上一篇“海风列国志”文章提到，风电在丹麦电力供应中的占比达到了50%，但它毕竟只是一个仅有500余万人口的小国，总量有限。在本期“海风列国志”文章中，我们来看看拥有6600万人口的欧洲大国——英国。

乡下的风车

1887年7月，苏格兰名为“Marykirk”的乡下，电气工程师詹姆斯·布里斯（James Blyth）在自己的度假小屋院子中建造了世界上第一台风力发电设备，通过向蓄电池充电，继而为度假小屋提供照明电力。詹姆斯·布里斯在随后发表的论文中如此描述他的风电机组：“这台风电机组采用三脚架的设计，风轴长33英尺，风臂长13英尺，端部有帆布制作的风帆，通过绳索和飞轮连接一台布尔津发电机。”

受限于当时的技术条件，风力发电毫无性价比可言，因此，它并未受到社会的重视。直到1970年，英国才开始重新评估工业规模风力发电的可行性。

1991年，英国第一座商业运营的陆上风电场在英格兰南部Delabole地区建成，安装了10台单机容量为400千瓦的风电机组。

在接下来的20多年中，英国陆上风电发展迅速，截至2020年年底的建成装机规模已超过1300万千瓦，约占年电力供应的13%。

然而，由于现代风电机组的尺寸越来越大，英国（苏格兰除外）对陆上风电设施提出的125米限高要求，近年来在技术上限制了陆上风电的开发。因此，英国人很自然地将目光投向了大海。

英国四面被北大西洋围绕，海域面积广阔，大风天气频繁，海上风能资源约占欧洲总量的1/3，号称欧洲第一。据估算，如果英国将其0~25米水深海域的1/3开发，就可以使风电装机规模达到4000万千瓦，达到2020年夏季英国全国电力需求约90%的水平。

当然，在海上风电刚起步时，英国面临的问题是：成本太高。英国政府的解决办法是，要求电力提供商必须以规定价格采购一部分风电，否则就需缴纳罚款，此即从1990年开始实施的NFFO（Non-Fossil Fuel Obligation，非化石燃料合约）机制。在起步阶段，借助该政策，英国海上风电行业获得了至关重要的财政补贴，从而在成本高昂的初期得以生存。

得益于NFFO机制，英国的第一座海上风电场Blyth（以本文开头提到的第一台风电机组的发明者命名）于2000年建成，这是全球第三座海上风电场。Blyth海上风电场仅安装了2台单机容量为2兆瓦的风电机组，它们是当时世界上最大的海上风电机组。

王室的许可

在英国海上风电发展过程中，有一个机构值得一提。英国海岸线以外12海里的海域，绝大部分属于“英国女王持有的公共财产”，由一个半独立法人实体Crown Estate代为管理。因此，英国海上风电，特别是初期近海浅水海域的项目开发，必须得到Crown Estate的许可。

1998年，英国风能协会，即现在的RenewableUK，在英国政府的同意下，开始与Crown Estate协商，并于1999年达成协议，由后者发出17个具有试验性质的项目建设许可，主要目的是积累海上风电场建设和运营经验。这就是英国海上风电开发史上的“初始轮”，起点很高，总装机容量达到120万千瓦。

2002年后，NFFO机制逐步被RO（Renewable Obligation，可再生能源合约）机制取代。后者在本质上是前者的升级版，将英国电力提供商必须采购的可再生能源比重提高到11.1%，并于2015年进一步增至15.4%。达标的电力提供商每提供1兆瓦时的并网电力，会获得一份ROC（Renewable Obligation Certificate，可再生能源合约证书）。到2008年，陆上风电和海上风电被区分开，电力提供商每提供1兆瓦时海上风电的并网电力，会获得双份ROC。

2003年，依托RO机制框架，英国在第二轮海上风电开发中授出了15份建设许可，规划装机容量达到720万千瓦。

2008年，英国海上风电装机容量超过丹麦，跃居世界第一。

同年，经过对前两轮经验教训的总结，Crown Estate批准了规模庞大的第三轮海上风电开发计划，规划装机容量达到2500万千瓦。

2010年，Crown Estate批准了初始轮和第二轮项目的扩展计划，规划装机容量为200万千瓦。

2015年，英国政府宣布RO机制将由CfD（Contract for Difference，差价合约）机制取代，成为海上风电开发新的补贴方式。不同于之前的模式，CfD机制采取划定可再生能源并网电价的形式，成本如超过并网电价，由政府补贴；反之，则需要上缴这部

分利润。CfD 机制在很大程度上消除了投资者面临的不确定性，增加了其投资可再生能源的信心。

2019 年，第四轮英国海上风电开发计划基于 CfD 机制框架发布，总装机容量为 700 万千瓦，包括目前全球最大的海上风电项目——Dogger Bank。

到 2020 年 12 月底，英国海上风电累计装机容量突破 1000 万千瓦。这其中，也有中国资本的身影。

预计到 2025 年，英国海上风电累计装机容量将达到 2020 年的 2 倍，即 2000 万千瓦。

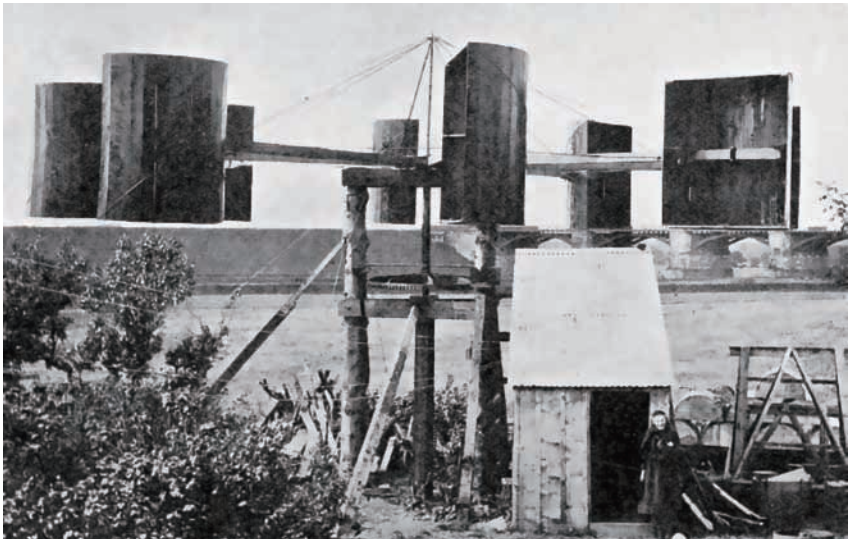


图1 布里斯制造的风电机组

图2 向2万户苏格兰家庭供电的Hywind Scotland项目

（来源：Equinor）

帝国的野望

日前，英国政府承诺到 2030 年使海上风电累计装机容量达到 4000 万千瓦，加上陆上风电现有的 1300 万千瓦装机容量，英国风电总装机容量将确定超过 2020 年的全国全部电力需求水平（约 5000 万千瓦）。

据估算，为达到这个雄心勃勃的目标，需要 500 亿英镑（约合人民币 4387 亿元）的新增投资，这对英国政府来说也是个很大的挑战。

除了资金，英国海上风电开发面临的另一个问题是可用海域。前文提到，英国如果开发其水深不超过 25 米海域的 1/3，海上风电装机容量可达到 4000 万千瓦。1/3 为概数，是综合考虑地质水文条件、航运、国防、海洋生物保护等因素后，这部分海域在理论上的最大可用比例。也就是说，至 2030 年，英国为达到 4000 万千瓦的海上装机目标，25 米水深以下可用海域将基本告罄。

在水深超过 25 米的海域，固定式海上风电的经济性优势已被极大削弱，漂浮式风电成为一个无法忽视的选项。英国政府为了推动海上风电的可持续发展，早已开始行动。

英国拥有世界第一座，也是截至目前唯一一座商用漂浮式海上风电场，即在苏格兰海域由挪威能源公司 Equinor 设计、开发、运营的 Hywind Scotland。该项目的水深为 95~120 米，安装了 5 台 6 兆瓦漂浮式风电机组，于 2017 年建成投产。

英国政府在 Hywind Scotland 项目上投入了大量的财政补贴，目的在于尽快积累漂浮式海上风电的建设和运营经验，为将来走向深海做好准备。

2020 年 10 月，英国政府正式提出到 2030 年使漂浮式海上风电装机容量达到 100 万千瓦的目标。目前，英国仅有 Hywind Scotland 项目，装机容量为 3 万千瓦，意味着在未来 10 年内，英国需要建设至少 97 万千瓦的漂浮式海上风电。对包括 Equinor 在内的漂浮式海上风电方案提供者来说，这是一个巨大的机会。

2020 年 10 月，英国首相鲍里斯·约翰逊在保守党大会上提到风电开发计划时表示，英国将成为“风中的沙特阿拉伯”（原文为“Saudi Arabia of wind”）。这个目标能否实现，让我们拭目以待。

可靠 - 源自专业

winergy

风机驱动方案的未来在于：
HybridDrive混合驱动

- 功率密度高
- 体积小
- 可靠性好
- 效率高

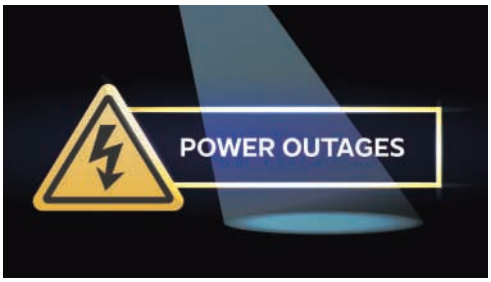
十年一剑...

威能极具有远见卓识，十年前业已研发3MW混合驱动方案，
目前可提供3 - 10MW成熟混合驱动解决方案。

www.winergy-group.com

广告

得克萨斯州大面积停电让谁颤抖



本刊 | 孙一琳

2 月底暴风雪过后，美国得克萨斯州居民终于迎来久违的阳光，可针对该州电力系统的声讨才刚刚开始。

遭难

自美国东部时间 2 月 12 日起，暴风雪席卷该国南部、中西部和东北部地区，造成多地大面积停电。其中，受影响最大的是得克萨斯州。据了解，该州大部分地区属温带气候，南部部分地区为亚热带气候，冬季平均温度超过 15℃。此次出现暴风雪天气，实属“百年一遇”。

当地时间 2 月 18 日，得克萨斯州电力可靠性委员会（ERCOT）在一份声明中表示，剧烈降温使电力系统瘫痪，影响到该州 90% 的地区。尽管部分地区已恢复供电，但为了确保电网稳定，未来几天将采取轮流供电的方式。截至当地时间 2 月 19 日，该州仍有近 23.8 万户家庭和商户停电。得克萨斯州电力可靠性委员会于 2 月 24 日发布的官方报告显示，在极端天气席卷得克萨斯州期间，一度有高达 48.6% 的发电机组被迫停机。

当大部分得克萨斯州居民无电可用时，有电可用的居民则面对着令人咋舌的电价。暴风雪肆虐，导致得克萨斯州的电价较 2020 年飙升近 450 倍，至 9 美元 / 千瓦时（约合 59.08 元 / 千瓦时）；加上拥堵费等，部分地区的电价达到 12 美元 / 千瓦时（约合 78.77 元 / 千瓦时）。

“一把冰冷、锋利的匕首刺穿了美国最大、最值得骄傲的化石燃料生产地得克萨斯州，数百万人被困在没有光和热的地方。”《纽约时报》如此形容道。

民众在严寒和黑暗中苦苦挣扎，得克萨斯州的支柱产业更是岌岌可危。据财联社报道，由于停电和设备被冻，得克萨斯州的畜牧业、棉花等种植业遭到重创。同时，该州作为美国原油和天然气生产第一大州，大量的油井和炼油厂被迫停产，天然气和原油运输受到限制。

2 月 20 日，美国白宫发表声明称，总统约瑟夫 · 拜登已于此前一天宣布得克萨斯州存在重大灾难。

质疑

公众开始质疑得克萨斯州的电力系统。暴风雪的到来固然是天灾，极端的严寒天气刺激着居民提高电加热器的运行频率，直接导致电力需求超出了电网运营商预计的最极端情况。然而，电网面对极端天气表现出的脆弱性也令人心惊，数百万人因此遭受苦难，甚至有人丧命。未来，伴随气候变化加剧，各类自然灾害可能会更加频繁地出现，电网能否经受住考验？令人绝望的场景是否会再次上演？得克萨斯州，美国，乃至全世界都在反思。

部分专家和媒体将此次大面积停电归咎于政府和相关机构的不作为。得克萨斯州电力可靠性委员会在暴风雪期间通过媒体发布大量消息，要求居民减少用电；不断主动采取停电措施，以保障部分特殊地区的供电，种种举动都激起了民众的愤怒。为平息事态，急需政府给出令人信服的解释。于是，我们听到了各种各样的声音。

可再生能源首当其冲。“可再生能源使得克萨斯州的电力系统处于不稳

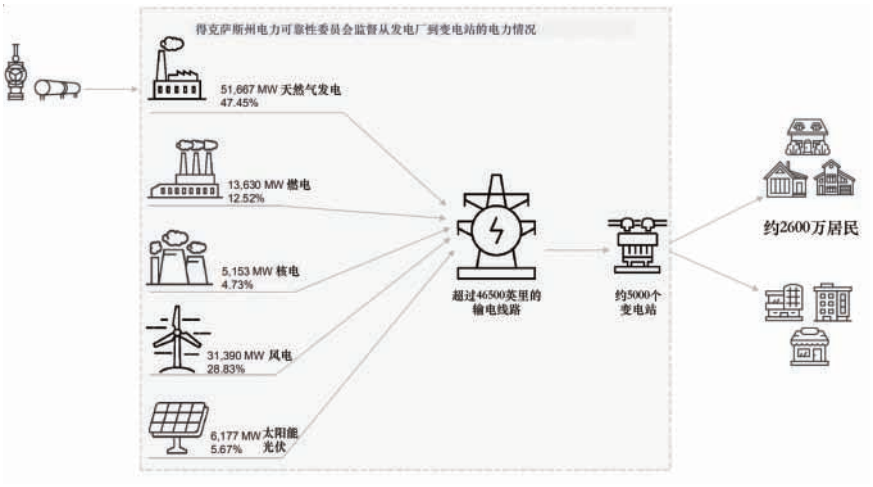


图1 美国得克萨斯州电网运行示意

定的状态，别再增加这些无用的电力了！”停电发生后，美国保守派政客有关得克萨斯州过于依赖可再生能源导致一系列灾难的论调，频频登上各大媒体平台的头条，随文还配上了挂满冰霜的风电机组图片。

需要承认的是，风电机组出力在此次暴风雪期间确实出现了较大波动。数据显示，从 2 月 15 日凌晨 3 时至 2 月 17 日 12 时，在风电发电效率最高的时间段内，其容量系数达到 91%；在发电效率最低的时间段内，其容量系数仅为 2%。但是，这绝不是可再生能源自身原因造成的。环顾全球，在中国内蒙古地区的零下 30℃环境中，风电机组依然保持正常运转。这说明，得克萨斯州风电停摆只是“孤星之州”的个例。美国《华盛顿邮报》指出，可再生能源在暴风雪肆虐期间只造成了 13% 的电力中断，且仍旧满足着全州 25% 的能源需求。

在这场暴风雪中，极端低温同样致使天然气管线急冻，油气井口和天然气输气管道结冰，生产作业被迫中断。得克萨斯州电力可靠性委员会公布的数据显示，该地区的天然气日产量下降了 60 亿立方英尺（约合 1.7 亿立方米），降幅达 50%。而天然气发电是该州的主要电力来源。

此次大面积停电暴露出得克萨斯州的电网基建落后。即使未超过负荷，该州的能源基础设施也无法抵御极端严寒天气的冲击。一方面，该州的所有基础设施基本只适应或温暖、或炎热的天气，不具备抗寒能力。在缺少防冻措施的情况下，任何设备都难以维持正常的运转。早在 1989 年，美国联邦政府就曾警告该州需要对电力设备进行防寒处理，以应对极端天气的突发情况。另一方面，电网没有足够的储备以应对极端和突发状况。2011 年 2 月，寒潮来袭，得克萨斯州的 300 万居民在用电高峰期遭遇断电。当时，美国联邦能源监管委员会（FERC）发布报告指出，该州电力公司与监管机构应当采取行动，建立应对极端需求时期的能源储备。或许出于降低成本的考虑，州政府和管理机构并未据此作出改进。

独立的电力系统让得克萨斯州在遭遇极端天气时孤立无援。这是客观情况——该州拥有独立的电网，不受联邦政府监管，由得克萨斯州电力可靠性委员会独立运营。这个机构作为得克萨斯州公用事业委员会（PUC）认证的独立组织，负责供应全州约 90% 的电力，管理着超过 74834 千米的输电线路，覆盖了约 2600 万德克萨斯州终端用户。得克萨斯州由此成为美国电力市场化程度最高的地区，也让电力批发电价一度处于世界最低的水平。数据显示，2019 年，该州的批发电价只有 3.8 美分 / 千瓦时（约合 0.249 元 / 千瓦时），2020 年更是低至 2.2 美分 / 千瓦时。得克萨斯州政府与人民一直为此感到自豪。但在危机面前，优势变成了劣势。得克萨斯州仅能通过一条 345kV 的电网通道与美国区域电网运营商西南电力联营公司（SPP）互联，其余电网无法为该州供电，面对极端天气，只能束手无策。

我们无法预测，当下一次极端天气降临时，电力系统会有怎样的表现；抑或让独立的电网系统并入大电网之后，能否让得克萨斯州的电力体系更加完善。但需要明确的是，在悲剧发生后，不应基于个人喜好或党派斗争进行无端指责，更不能试图从中攫取政治利益。无论是政府、企业，还是媒体，都需专注于建立更为经济、公平的弹性电力系统，并通过进一步完善管理模式来确保能源供应安全。

依托行业大赛 加快风电技能型人才培养的实践与思考*

文 | 李良君[1]，何昌国[2]，王华君[3]

风电人才，尤其是高素质技能型人才，远不能满足行业发展的需要。职业院校学生风电技能大赛，与企业实际工作状况和岗位要求密切结合，在提高学生动手能力、训练逻辑思维、培养职业素养和团队协作方面，起到了很好的促进作用，是实现风电技能型人才培养和校企合作的一个绝佳途径。

风电行业技能型人才需求现状

随着风电产业规模的迅速扩大以及风电技术的快速发展，人才短缺问题日益突出。国际可再生能源署（IRENA）于 2019 年发布的报告显示，中国风电总就业人数达到 51 万，接近全球的一半。从理论上来说，企业需要的“高级蓝领”人才，不仅应具有良好的职业素质，同时还需具备专业的风电知识和技能。然而，很多风电企业在招聘风电专业毕业生时，甚至连人数都未作规定，只要符合基本要求，有多少招多少。由此可见，风电制造和服务市场存在较大的人才缺口，这已经成为制约产业发展的突出问题之一。

风电行业对技能型人才的需求，主要集中在机械加工与装配、电气系统安装与调试、风电机组运行与维护、风电场运行管理、质量检测等岗位。

开展行业大赛对技能型人才培养的促进作用

风力发电系统安装与调试技能竞赛是由机械工业教育发展中心、全国机械职业教育教学指导委员会主办，全国机械职业教育教学指导委员会新能源装备技术类专业指导委员会、相关企业和学校承办的风电行业职业院校学生技能大赛。大赛紧贴风电行业实际，围绕风电机组安装与调试所需的关键技能，设计了 2 个竞赛阶段、4 个竞赛模块、16 项竞赛任务，除重点考核风力发电系统的安装与调试等核心技能外，还对团队合作精神和职业综合素养进行考察。大赛采取团体竞赛形式，每支参赛队伍由 3 名在校学生组成。大赛共持续 4 个小时，中间休息半个小时。

竞赛内容包括职业素养和实操技能两个部分。职业素养竞赛主要考核参赛队伍的职业道德水平、职业安全意识和团队合作能力。实操技能竞赛分为风电机组整机厂装配与调试、风电场整机吊装与调试两个阶段，包括风轮装配与吊装、机舱装配与吊装、发电系统吊装、塔筒吊装、电气接线和组装，以及包括控制系统、操作系统、监控系统、编程系统等在内的软件调试。

大赛基于图 1 所示的直驱型机组模型，模拟企业真实的车间装配调试、

* 本文系国家级职业教育教师教学创新团队课题“新能源与环保技术专业领域团队共同体协同合作机制研究”（课题编号：TX20200111）阶段性研究成果
1.天津轻工职业技术学院；2.天津明阳风电设备有限公司；3.天津市新能源协会

风电场吊装调试全过程，使学生可以很好地了解实际机组的构造，以及各个岗位的工作任务，有利于实现学校培养与企业用人的无缝对接，大大提高学生的技能水平和职业素养。

风力发电系统安装与调试技能竞赛，对内，能够推动职业院校风电及相关专业的建设，展示职业院校专业的教学改革和实践成果；对外，能够促进职业院校紧贴风电产业发展与需求，培养高技术技能人才。

1. 养成良好的职业素养

良好的职业素养，是一个职业人的基本素质。学生如果在走上工作岗位之前能够养成良好的职业素养，会少走弯路，受益终生。

具体来看，学生通过在训练和比赛中接受职业道德规范的教育，逐渐养成遵纪守规、尊重他人、听从指挥、爱护设备、保护环境的良好习惯。由于大赛在着装、安全操作等方面都有严格要求，学生通过长时间的强化训练，其职业安全意识将得到极大提高。由于大赛贴合实际工作情境，很多工作任务需要多人共同完成，在此过程中，学生们的团队协作精神和沟通协调能力能够得到很好的锻炼和提高。此外，大赛在某些任务安排，尤其是编程和操作监控画面设计方面，给予学生很大的想象和设计空间，对于增强职业院校学生的创新能力将起到很好的促进作用。

2. 提高专业技能水平

大赛的第一个竞赛阶段主要模拟整机厂车间装配，其中包括风轮装配与调试、机舱装配与调试两大模块。第二个阶段模拟风电场整机吊装和调试，包括塔筒、机舱、发电机、风轮、叶片的吊装，以及整机电气组装、控制系统编程、整机调试与运行。

图1 技能大赛用设备

图2 学生使用工具进行技能大赛训练

在大赛第一阶段，通过风轮组装、机舱组装等环节，学生能够学会并熟练操作使用吊车和力矩扳手、棘轮扳手、开口扳手、活扳手、套筒、螺丝刀、塞尺等工具，按照工艺规程要求，完成车间装配任务，提高机械装配动手能力。

大赛第二阶段的整机吊装和调试运行，还原了风电场现场安装调试作业任务。在该阶段，学生能够在不到达风电场现场的情况下，理解和掌握塔筒、机舱、发电机、风轮、叶片的吊装流程和操作规范，以及整机调试运行的要求，提高实操水平和能力。

电气接线和组装调试，贯穿了大赛的两个阶段。学生通过做线、接线、布线和组装电气部件，不但能熟练使用斜口钳、剥线钳、压线钳、梅花起、端子起和套筒等工具，还可以进一步提高对电气原理图、接线图的阅读理解能力，锻炼科学、合理、高效布线的意识和水平，树立电气系统整体概念，积累电气调试的经验和方法，增

强电气系统安装调试能力。

此外，在大赛的两个阶段，分别安排了变桨系统编程、偏航系统编程和整机控制系统编程，以及各阶段调试所需的操作监控界面设计，要求学生能够系统理解和掌握风电机组的控制逻辑、策略和方法，在编程和操作监控界面设计的过程中，有整体、清晰的条理性和逻辑性。这些内容对于培养学生的逻辑思维能力、结构设计能力，都起到了非常好的促进和提高作用。

技能大赛取得的成效

风电行业大赛有助于职业院校风电专业的教学改革与创新，对于实施高水平技能型人才的培养，起到了促进和提高作用，毕业的学生因此将更受企业欢迎。以天津轻工职业技术学院风电专业为例，从 2017 年年中购进相关设备开始，在相关课程中使用大赛设备对学生进行教学。学生通过学习和操作大赛设备，明显提高了学习风电知识的兴趣，对风电行业和企业的认可度明显增强，越来越多的学生从中受益。

相对于只在相关理论课程上学习和观摩大赛设备的学生，参加行业大赛的学生投入了更多的时间和精力，职业素养更高，安全意识和团队协作精神得到强化，专业知识掌握得更加深入和全面，动手能力获得更多锻炼，逻辑思维能力和统筹协调能力更是有了质的飞跃。

图3 风电场塔筒吊装模拟操作

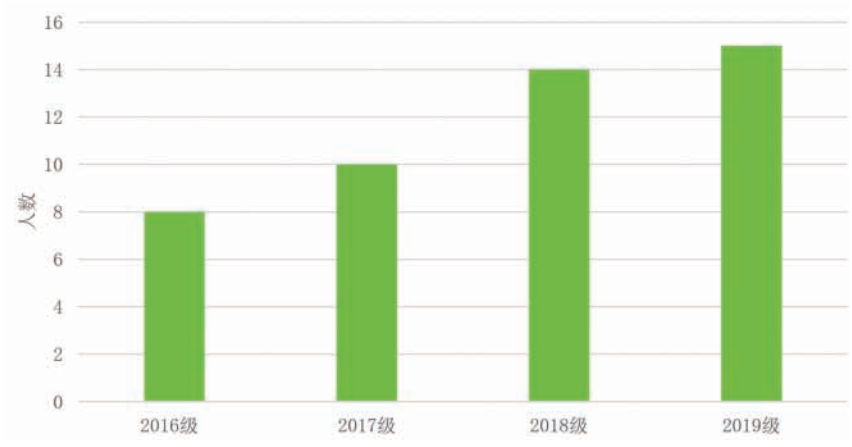


图4 2016—2019年参赛学生人数统计

建议与思考

技能大赛与职业院校专业教育教学相融合，推动专业课程改革和实施，不仅有助于职业院校的专业建设和高素质技能型人才的培养，也有利于行业的健康发展，可以有效解决企业用人的结构性矛盾。风电行业大赛促进风电专业技能型人才培养的模式，值得在职业院校的各类专业中推广。

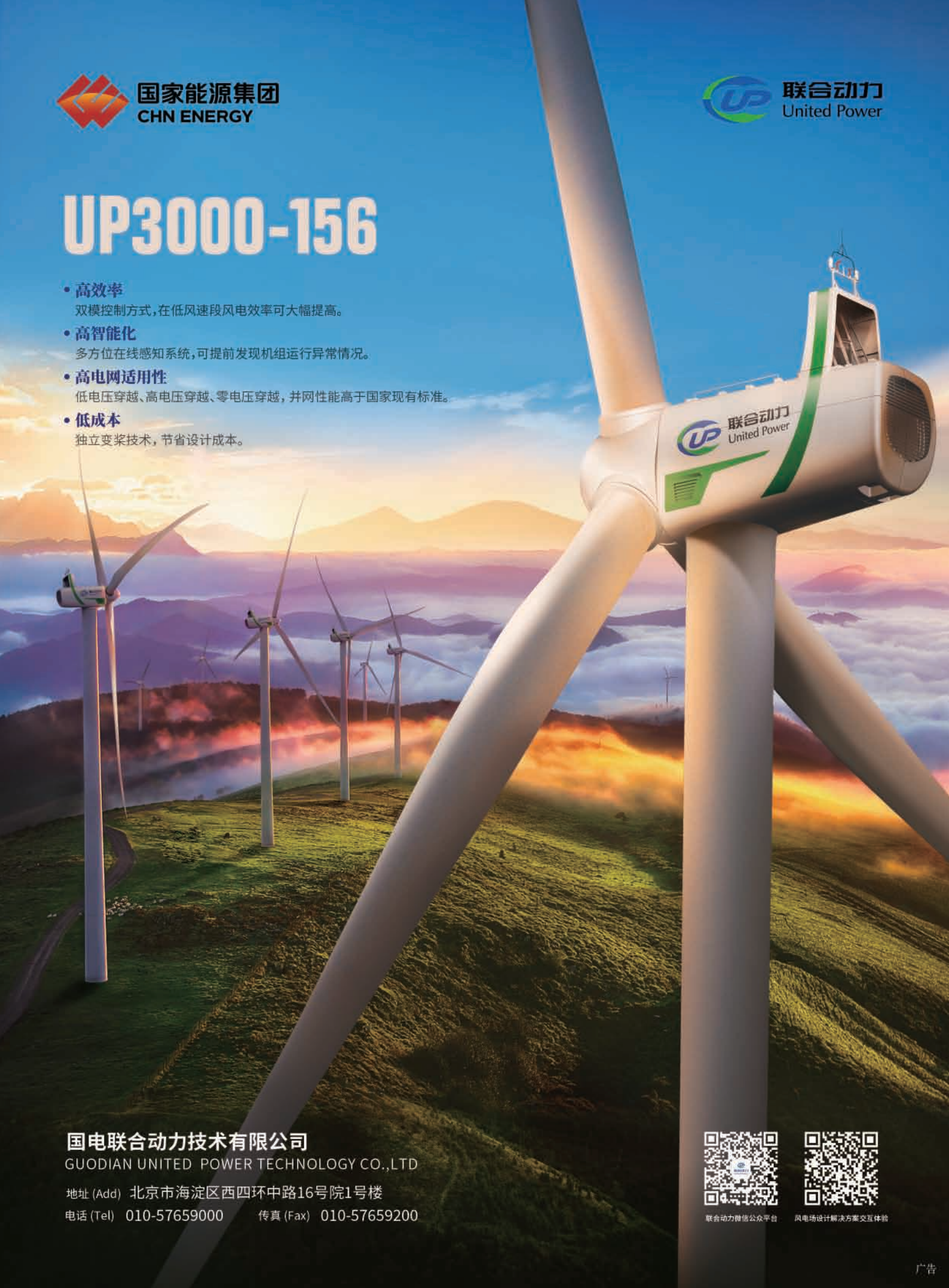
我国风电产业发展已进入平价时代，创新发展不仅体现在研发设计环节，在风电设备制造与运维环节也蕴藏着巨大的创新潜力和空间，高素质的技术技能型人才将在其中起着不可或缺的作用。希望更多的风电企业投身于风能职业人才培养，组织多种形式贴近工程实际的大赛活动，将更多真实工业环境的领先技术进行教学还原，使行业前沿技术及时进入学生视野。同时，针对风电机组和风电场运行检修与维护开发新的行业大赛，促进学生更加全面地掌握风电相关技能。由此，借助企业环境、产教融合，共同培养大批有创新意识、有操作技能、富有团队精神、具备科技素养的风电应用型人才，推动中国风电产业发展再上新台阶，使风电成为在各类电源中最具竞争力的绿色能源。

国家能源集团
CHN ENERGY

联合动力
United Power

UP3000-156

- **高效率**
  双模控制方式，在低风速段风电效率可大幅提高。
- **高智能化**
  多方位在线感知系统，可提前发现机组运行异常情况。
- **高电网适用性**
  低电压穿越、高电压穿越、零电压穿越，并网性能高于国家现有标准。
- **低成本**
  独立变桨技术，节省设计成本。

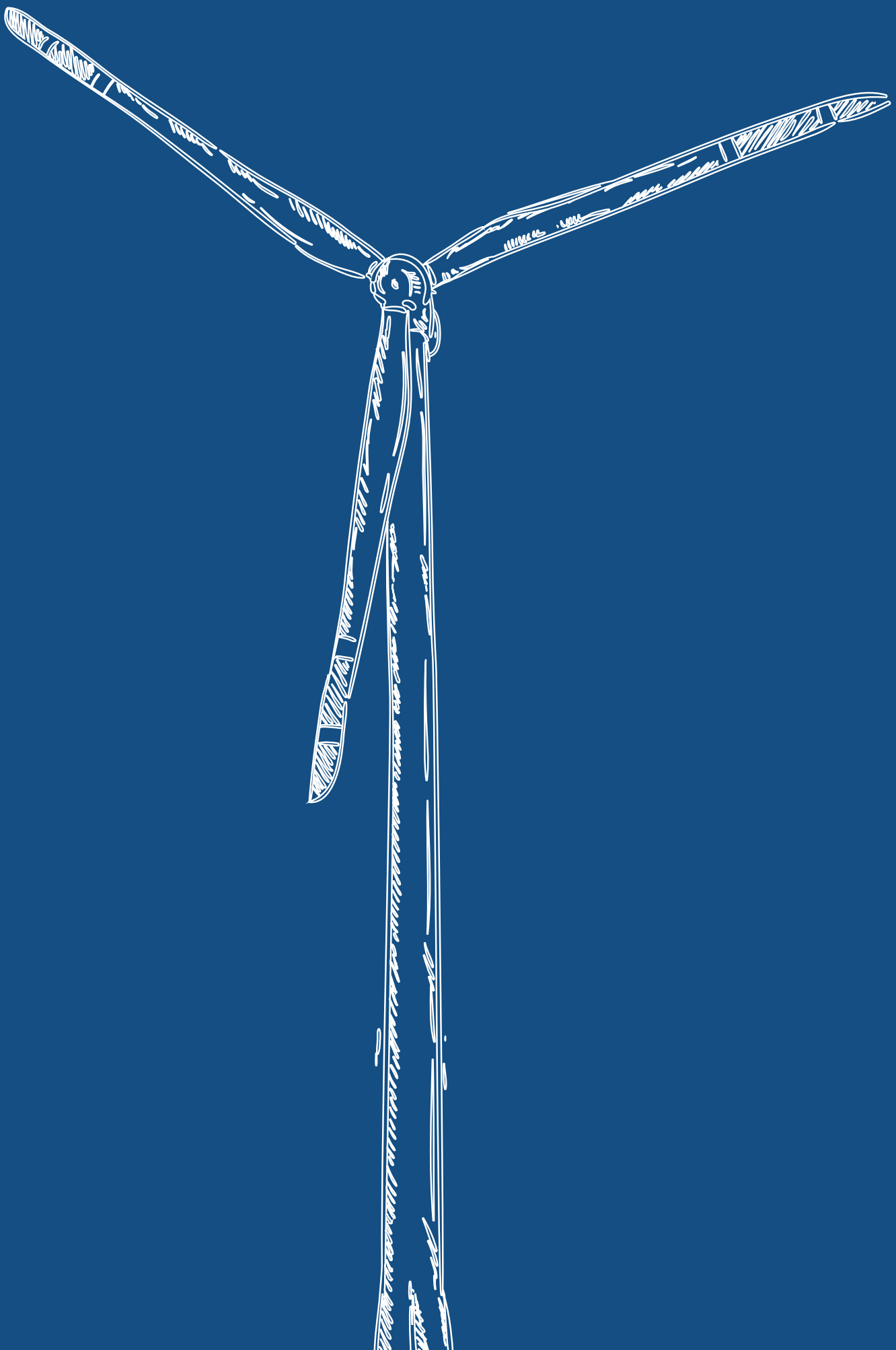


国电联合动力技术有限公司
GUODIAN UNITED POWER TECHNOLOGY CO.,LTD
地址 (Add) 北京市海淀区西四环中路16号院1号楼
电话 (Tel) 010-57659000 传真 (Fax) 010-57659200

联合动力微信公众平台

风电场设计解决方案交互体验

广告



“平价风电机组开发”专题

随着风电平价时代的到来，平准化度电成本（LCOE）已成为投资决策的关键指标。因此，风电行业将比以往更加关注机组在特定场址中的全生命周期性能表现。受此驱动，在陆上风电大基地和海上风电大基地并轨的发展阶段，机组定制化，这种能够兼顾开发成本与项目发电收益的开发范式逐渐进入大众视野，将与其他风电机组发展趋势一道为风电平价铺平道路。

为探寻并解决平价机组开发的技术难题，2020 年 10 月 12—13 日，在北京鉴衡认证中心与新疆金风科技股份有限公司联合举办的第六届“御风之道”风能资源高级研讨班上，来自风电开发商、设计院的资源评估、设计、技经等领域的专家聚焦于此，分享了平价时代下资源开发规划和整机设计的经验，剖析了平价机组开发和定制化设计的理念、流程与方法。

结合会议召开的情况，本刊围绕机组定制化开发的重点及关键技术、塔筒定制化设计的载荷复核及新技术应用、在役风电场增功提效、平价项目精细化测算等角度，选取会上取得的部分重要成果形成本期专题，希冀能够帮助业界研判机组定制化等相关技术的可行性，加深大家对此类技术的理解。

P56 ▼ 浅谈风电平价大基地项目机组定制化开发模式

P60 ▼ 塔架定制化设计中的载荷优化方法探讨

P66 ▼ 定制化浪潮下风电机组设计关键技术分析

P70 ▼ 基于资源评估的在役风电场增功提效方案制定探究

P74 ▼ 平价时代风电项目投资特点与趋势

浅谈风电平价大基地项目机组定制化开发模式

文 | 刘鑫

经过十多年的高速发展，在技术进步以及产业链升级的推动下，我国风电度电成本持续下降，并迎来平价时代。为进一步降低风电成本，规模化连片开发，尤其是在政府的支持下，在重点区域打造千万千瓦级平价大基地，成为重要的开发模式。从前期规划、工程建设到运营维护，以“一盘棋”的思路对项目进行整体协同和一体化设计，降低重复或冗余建设、资源浪费等非技术成本，可大幅降低前期、建设和运维成本，挖掘出更大的降本潜能。

以往，风电机组的设计与选型是分离的，设计阶段所考虑的环境条件，不一定与实际资源条件相吻合，导致风电机组在实际运行过程中，存在风能资源利用效率较低、功率曲线不达标、振动超限、载荷过大等问题。在风电无补贴上网的大趋势下，再走过去粗放式发展的道路已不现实，必须精打细算，从源头上提高机组对风能资源的利用效率，降低运维成本，保障项目经济性。因此，针对大基地的特定边界条件，通过单机容量、风轮直径、场址容量等多个变量的最优组合，实现项目最佳收益的机组定制化开发模式逐步成为科技前沿和讨论热点。

本文在分析目前大基地项目开发模式局限性的基础上，对比分析了机组定制化开发模式的优势和关注重点，并给出平价大基地项目机组定制化开发的初步建议，以供国内风电开发企业参考。

大基地项目开发现状

传统风电项目开发方式是指设计单位或整机厂商根据项目资源，经过前期踏勘、风能资源分析、微观选址等流程，考虑项目特征、机组适应性和收益要求，在已有产品系列中选择适用机型，进行机组匹配。

目前，大基地开发建设仍处于探索阶段，市场主流的“机组选型 + 整机投标”大基地模式的具体构成为：可行性研究 + 方案投标 + 平台化改进 + 订单式供货 + 安装吊装 + 运行维护。该模式主要存在技术、进度、质量和经济性等 4 个方面的局限性。

1. 技术局限性

可研阶段机型适配性不强。大基地项目的自然条件，包括风能资源、地质以及水文条件等，存在巨大差异；其他条件，如政策、补贴、税收、电力送出消纳等也因地而异。过往的机型开发缺乏针对性，无法完全满足大基地项目对机组差异化的需求。传统意义上，风电机组厂家基于 IEC 要求开发标准化风电机组产品，而标准化机型通常需要覆盖某个较大范围的区域或针对某个大市场，具有特定的设计等级，不一定完全匹配大基地项目的风能资源，无法针对大基地项目进行充分的机组和风电场设计优化工作，造成设计冗余或紧缩，使得特性（风速、地形、气候、海拔等）各异的大基地项目无法真正实现收益最大化。

高新技术运用程度不高。目前，大基地项目的机组选型和整机投标存在割裂现象。由于开发商无法完全掌握机组研发的最新技术进展，也不了解具体技术对项目可行性和经济性的影响，往往倾向于选择相对成熟且应用较多的机组和技术。同时，掌握高新技术的整机厂商介入时间晚，对场址测风、设计、集电线路等的研究也不够深入，受招标时间影响，对高新技术的应用较为保守。在上述情形下，大基地项目对高新技术的应用就存在一定不足，无法实现由技术研发

向经济效益的快速转化。

2. 进度局限性

在目前“机组选型 + 整机投标”的递进式进度下，整机厂商中标后进一步优化机型的效率低下。由于整机厂商前期参与度不深，后续各零部件优化改进时间紧、难度大，新技术应用存在风险，导致优化改进后零部件生产供货的及时性和工艺可靠性都大大受限，容易在一定程度上造成整体进度的滞后。

3. 质量局限性

风电项目开发周期长、过程复杂，前期工作需各方投入大量资源，而基于现有招投标模式各方很难开展深度合作。在中标后的优化改进中，把控工艺可靠性的难度大大提升，整机运行的可靠性存在未知风险，新平台、新技术、新部件由于验证不足也会带来不确定性。

4. 经济局限性

资源利用不充分，发电能力受限。大基地项目风能资源较好，但在目前整体规划不够精细的模式下，项目开发存在看机型谱系选址选型的问题，机组与资源的适配性在一定程度上受谱系限制。因此，项目方案很难实现发电量最高，更遑论达到度电成本最优。

前期降本能力有限。在目前的开发模式下，前期各环节的衔接不够紧密，压缩了降本空间，主要表现为：其一，设计阶段的机组选型趋于保守，人为增加部分参数的安全裕量，环节过多导致安全裕量叠加，进而导致成本投入增加；其二，新技术应用缺乏全局性，无法从整个项目流程的角度考量新技术的经济性，难以达到规模化降本的目的；其三，场站、道路、集电线路设计布置与实际存在较大出入，导致成本偏高。

安装时间长，成本偏高。由于受到机组可选谱系限制，对天气、地形、道路、植被等影响安装施工条件因素的考虑不足，同时缺乏对特定吊装设备的开发研究，导致安装时间较长，增加了建设安装成本。

运维阶段成本较高。目前，大基地项目的运维存在两方面问题：其一，后期运维阶段采取“一刀切”的做法，没有从不同技术路线、不同机型可靠性角度出发，开发针对特定机型的运维模式、运维策略和运维工具，导致机组维修费用较高；其二，机组与资源条件的不匹配无形中推高了故障率，增加了运维费用。

流程较长，占用资金。由于缺乏合理的一体化建设方案，各阶段流程冗长，铺底资金偏多，资金流动性不足，易造成较高的建设期利息，导致项目经济性受限。

机组定制化开发的优势

机组定制化开发是指结合风能资源、外部条件和收益需求，以项目为对象，进行机组的针对性研发。其需要考虑的主要参数，包括设计等级、单机容量、风轮直径、塔筒高度、基础类型、发电能力（单位千瓦扫风面积）和成本限制等，以在风电场发电量和造价之间取得平衡，获得最佳收益。

整机厂商提前参与项目资源规划与勘察设计，尽早提取项目特征，基于最优化 DFX（Design for X）设计原则（考虑资源情况、地质情况、敏感因素、环境约束、运输限制、消纳情况、运维、电价等），同步规划适用产品，定制设计基于项目目标的最优机型，从而降低投资的不确定性、提升资源开发价值、扩大资源开发范围。

开展机组定制化，会带来以下显著优势：

（1）发电量更优。通过深入分析项目特点、环境特点等，确保风能资源得到最佳利用，实现机型与项目的最优匹配。

（2）成本造价更低。主机、塔筒、基础载荷更低，成本更好控制；场站、道路、集电线路、布机方案更加合理，工程造价更低。

（3）项目建设更高效。各流程衔接更顺畅，吊装方案更精准，多源设备更好协调，工程建设周期更短，资金流动更通畅。

（4）机组设备更可靠。结合多方技术能力、经验、项目适应性开发设计风电机组，对零部件选型、安全裕量等因素考虑更加全面，零部件建模、设计、生产、试验、验证等的时间更充足，产品可靠性更高，风电机组运行更稳定。

（5）运营管理扩展性更强。基于定制化开发建设的项目，由于最佳的运维方案制定更早，其运维将更加高效、智能、经济。

机组定制化开发的关注重点及建议

风电机组定制化开发模式对于大基地项目实现最大化收益，将起到极为关键的作用。综合考虑开发流程以及影响

开发的主要因素，建议在开展机组定制化工作过程中重点关注以下 7 个方面的内容：

1. 场址条件

场址条件主要包括地形、地质、气象、气候、可选机位点数量等，通常会影响实际施工的可行性和便利性，从而间接影响机型（如单机容量和风轮直径）的设计。因此，需要针对大范围场址进行充分的前期观测规划，在尽可能节省成本的情况下获得场址最具代表性的观测资料，以精确的观测资料提前锁定目标区域。同时，开发商应当重视多元数据的同化工作，加强与整机厂商和设计院在项目前期的合作，对选定区域的风能资源条件与限制性因素进行普查，依据实际的资源条件与容量需求，制定包括发电能力、成本、适应性等在内的机组定制化开发指标。

2. 制造成本

机组定制化开发因其不确定性大、研发周期长、前期研发资金投入高等特点，整体制造成本较高。为减少制造成本，在技术路线的选择上，建议根据场址条件合理考虑容量、效率、体积、重量、运输便利性、吊装安全性等设计指标，同时严格管控制造流程，降低制造成本。

3. 设计能力

整机厂商应具备机组定制化的设计能力。从宏观上来说，包括正向设计能力、研发实力、设计管理能力、专利创新能力、大型科研项目参与能力等；从微观上来说，包含整机设计能力、叶片模块化设计能力、传动链设计能力、结构件设计能力、电气方案设计能力、基础设计能力、载荷安全校核能力、可靠性验证能力等。

4. 质量控制

由于开发和应用在时间上衔接较为紧密，定制化生产的风电机组无法像常规机组那样经历漫长的验证、认证和测试周期。为保障定制化机组的质量和出力的稳定性，需要在采用满足机组生产需求的定制化工艺基础上，重点关注生产及储运过程中的质量控制与管理。

5. 配套产业链和供应链

配套产业链和供应链主要涉及关键重大部件的配套能力、企业配套协同能力、产能供应能力以及全生命周期全域保障与抗风险能力。

针对供应链模式，建议围绕以下 4 个方面进行创新：

（1）核心供应链协同产品开发：叶片、传动链等核心供应链全程参与特定大基地的产品定制化开发，实现双向技术穿透。

（2）核心供应链协同产能布局：叶片、铸件等核心供应链就近产能落地，放大项目经济社会价值，降低运输等环节的成本。

（3）二级供应链穿透：与核心供应链共同布局其上游供货商，实现技术与商务层面的协同。

（4）备件安全：协同核心供应链的产品策略，确保长远期备件安全。

6. 并网条件

特高压大基地项目存在超 / 次同步振荡风险，需要关注柔性直流输送电技术的应用。另外，消纳、限电情况和电力交易模式也非常重要：消纳不足或存在限电情况，将导致非计划内的电量损失；电力交易模式将影响所发电量产生的经济收益。二者共同影响对发电需求的评价，从而影响机组的设计选型。

7. 项目后评估

风电机组的定制化设计需要关注项目后评估的情况，主要包含两点：其一，横向比较，从相同或相似资源条件下非定制化机组的运行评估结果出发，寻找现有机组的不足，在定制化开发过程中加以改进；其二，纵向比较，针对已有定制化机组项目的运行评估结果，寻找定制化过程中忽略或因其他原因暂时未能考虑的技术要点，并在后续定制化机组开发的过程中予以调整和完善。

结语

我国风电即将全面进入去补贴的平价时代。针对规模化连片开发的大基地项目进行机组定制化开发，有利于进一步降低风电机组的度电成本，创造更大的项目盈利空间。针对大基地项目机组定制化开发的特点，建议风电行业深挖痛点、直面难点，进一步推动技术发展，创新管理协作模式，在项目实施全生命周期、产业链全环节持续降本增效。在平价时代，借助定制化开发等技术创新带来的强劲动力，风电产业必将蓬勃发展，“风”景这边独好。

（作者单位：中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司）

广告

塔架定制化设计中的载荷优化方法探讨

文 | 蔡继峰，杨维佳，朱瑾

通常，设计者会结合标准给出的参考环境条件与可能的风能资源情况，进行风电机组的大类设计。当开发一个具体的风电项目时，为确定设计的风电机组是否满足场址要求，需要进行特定场址复核，包括对比特定场址与原设计条件的环境条件、载荷计算结果以及复核特定场址载荷结果的结构强度等三种方法。但这些方法仅考虑现有的设计是否可以满足环境条件，并未考虑是否存在更优的解决方案。

如果针对项目进行定制化设计，则存在进一步降低成本的可能性。考虑到塔架的设计改动相对容易，如果能根据实际项目进行塔架定制化设计，则可以在一定程度上降低项目的成本。塔架的定制化设计主要有实际项目的塔架载荷分析和定制化塔架结构设计两个关键环节。由于常规塔架的结构形式相对简单，因此，本文将重点针对实际项目的塔架载荷分析提出优化方法，以及分析如何应用新技术进行降载，为塔架定制化设计提供进一步的支撑空间。

特定场址塔架载荷精细化分析方法

目前，特定场址的载荷分析仍沿用较为粗放的方式。下面将介绍两种可在一定程度上降低塔架疲劳载荷水平、更为精细化的塔架载荷分析方法。

一、基于风向玫瑰的塔架疲劳载荷累积方法

由于来流风向分布未知，在设计时通常会将所有载荷作用在塔架的同一个方向，并且在进行特定场址复核时也沿用这种方式。但采用这种方式存在较大的不合理性，因为实际风向并不唯一。考虑到正对风向（可认为沿着机头的方向）时塔架所受的疲劳载荷是垂直方向的 2~3 倍，因此，来流方向的不唯一会为塔架受载带来益处。若能在特定场址塔架疲劳分析时考虑实际的风向分布，则存在降低疲劳

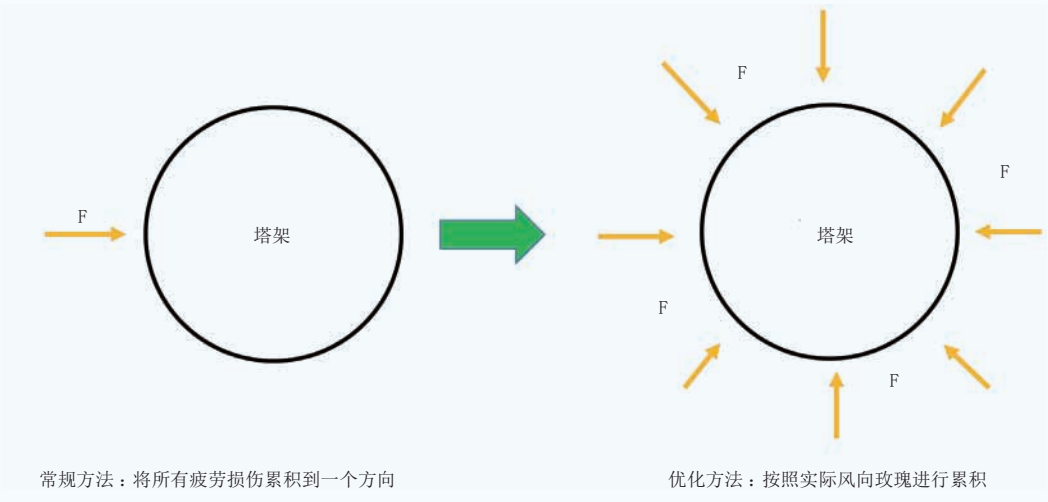


图1 精细化塔架疲劳累积优化方法

载荷的空间，具体方法如图 1 所示。

在不考虑扇区风能资源不确定性的前提下，由于沿着机头方向来流的疲劳损伤是垂直机头方向的 2~3 倍，考虑塔架材料系数 m=4，则沿着机头方向来流对疲劳的贡献比垂直方向大 1~2 个量级。因此，本文在不考虑机头垂直方向来流的疲劳贡献下，比对得到疲劳损伤降低和寿命延长的关系（表 1）。

由表 1 可知，当风向范围大于 90°时，两种方法的差异较为显著；当小于 45°时，结果较为接近。因此，当项目的风向玫瑰较为分散时，使用该方法才有意义。此外，应用以上方法时依然需要注意机组偏航策略对机组对风的影响，以及风能资源分析的准确度。

二、基于实际湍流分布的塔架疲劳载荷累积方法

目前，在为风电机组选取湍流强度时会使用风速 - 湍流强度曲线，但是实际风电场某一风速下的湍流强度并不是一个固定值，而是基于 P90 原则取值，即曲线上的任何一个点，能涵盖 90% 对应风速湍流强度样本的值。设计及实际风电场的湍流强度如图 2 所示。

对于极限载荷设计，为保证能充分考虑极端事件下的载荷，以满足一定的可靠性等级，采用 P90 方法较为合理。但对于疲劳设计，本身即为 20 年的累积，使用 P90 方法并非是最合适的方法。因此，若能根据实际湍流分布进行塔架疲劳的累积，由《基于湍流强度分布进行机组疲劳累积的方法探讨》（刊发于 2020 年 12 期《风能》杂志）的计算结果可知，可以降低 10% 以上的疲劳载荷。

降载技术应用效果分析及风险评估

应用新技术是降低载荷的有效手段。新技术应用前的评估方法，可参考鉴衡认证发布的《风电技术评估实施规则》，主要包括以下三个方面：

（1）原理及可行性：评估技术应用基础（基本原理）是否符合物理规律，相应硬件、软件设计方案是否符合功能定义且可被执行。

(2)效果评估:定性或定量确定评估对象功能执行效果。

（3）风险评估：评估新技术的引入是否会有额外的安全风险。

由于技术存在差异，可以结合理论分析与试验验证选

表1 不同来流方向分布下的损伤和寿命延长

	风向全对称	风向均匀地集中在 90°扇区	风向均匀地集中在 45°扇区	风向相同
塔架最危险处疲劳损伤降低的百分比	36.3%	10.0%	2.5%	0%
等价寿命延长的百分比	57.1%	11.1%	2.6%	0%

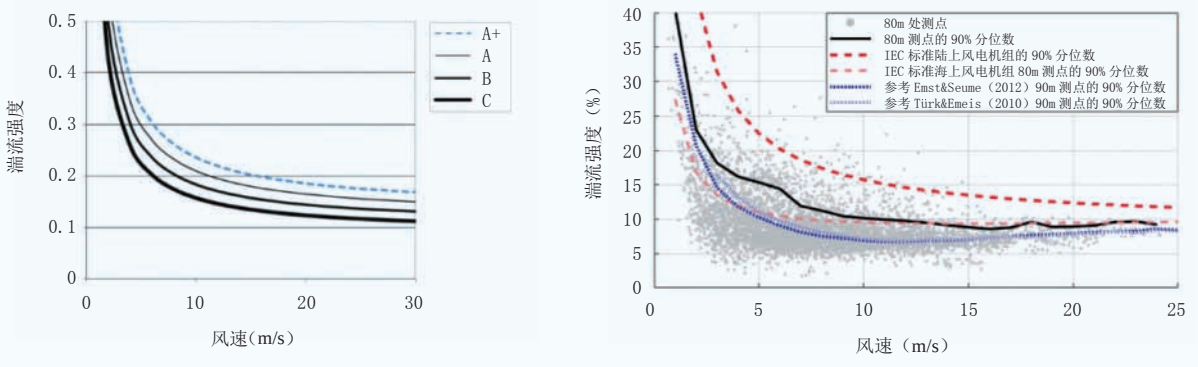


图2 不同湍流等级下湍流强度和风速的关系
（左图为设计等级，右图为实际风电场）

择具体的评估手段。

目前，行业关注度比较高的降载技术包括：独自变桨辅助控制技术（IPC）、激光雷达前馈辅助控制技术、塔架净空监控技术等。

一、独自变桨辅助控制技术

（一）技术原理

受到风剪切、塔影效应以及地形等因素的影响，风电机组风轮面上的流场并不均匀，使得风轮不同位置叶片面对的流场速度存在差异，导致各叶片受力不同，给风轮整体带来不平衡载荷。这种现象随着风电机组风轮尺寸的增加愈发显著。相较于传统的统一变桨技术（CPC），IPC（其原理见图 3）能够通过分别改变 3 支叶片桨距角的方式来降低风轮不平衡载荷，避免其被传递到机组其他非旋转组件，造成额外的载荷。

为了实现 IPC 对不平衡载荷的调整，首先需要获取各叶片实际的载荷情况。目前，测量叶片载荷的工具主要有对叶根进行测量的应变传感器、对整支叶片进行测量的光纤传感器等。在获取各支叶片的载荷后，通常会应用 Coleman 变换将旋转叶片的载荷投影到非旋转坐标系（d/q 坐标）上的俯仰和偏航弯矩，再通过 Laplace 变换将这两个分量转换到频域上，将 3 支叶片的载荷解耦。

叶根载荷由旋转叶片坐标转换为 d/q 坐标：

$$\begin{bmatrix} \overline{M}(t) \\ M_{tilt}(t) \\ M_{yaw}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{2}{3}\cos\phi(t) & \frac{2}{3}\cos\left(\phi(t)+\frac{2}{3}\pi\right) & \frac{2}{3}\cos\left(\phi(t)+\frac{4}{3}\pi\right) \\ \frac{2}{3}\sin\phi(t) & \frac{2}{3}\sin\left(\phi(t)+\frac{2}{3}\pi\right) & \frac{2}{3}\sin\left(\phi(t)+\frac{4}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1(t) \\ M_2(t) \\ M_3(t) \end{bmatrix}$$

式中，$M_1(t)$—$M_3(t)$ 分别为 3 支叶片叶根处的挥舞弯矩，$\phi(t)$ 为风轮方位角，$M_{tilt}(t)$ 和 $M_{yaw}(t)$ 分别为经过 Coleman 变换后的俯仰弯矩（d 轴）和偏航弯矩（q 轴）。

桨距角由 d/q 坐标转换到叶片坐标：

$$\begin{bmatrix} \theta_1(t) \\ \theta_2(t) \\ \theta_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos\phi(t) & \sin\phi(t) \\ 1 & \cos\left(\phi(t)+\frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\phi(t)+\frac{2}{3}\pi\right) \\ 1 & \cos\left(\phi(t)+\frac{4}{3}\pi\right) & \sin\left(\phi(t)+\frac{4}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\theta}(t) \\ \theta_{tilt}(t) \\ \theta_{yaw}(t) \end{bmatrix}$$

式中，$\theta_1(t)$—$\theta_3(t)$ 分别为 3 支叶片变桨角度，$\phi(t)$ 为风轮方位角，$\theta_{tilt}(t)$ 和 $\theta_{yaw}(t)$ 分别为经过 Coleman 变换后的俯仰角度（d 轴）和偏航角度（q 轴）。

（二）效果分析

IPC 通过额外变桨动作来降低周期性风轮不平衡，从而降低风电机组载荷。因此，IPC 主要会降低机组推力方向相关的疲劳载荷（表 2），当极限载荷出现在正常运行工况下，会少量降低极限载荷。

表2 IPC技术降载效果

载荷分量	降低幅度
叶根 My 疲劳载荷	10%~20%
旋转轮毂 My 疲劳载荷	20%~30%
固定轮毂 My 疲劳载荷	10%~20%
塔架 My 疲劳载荷	3%~7%

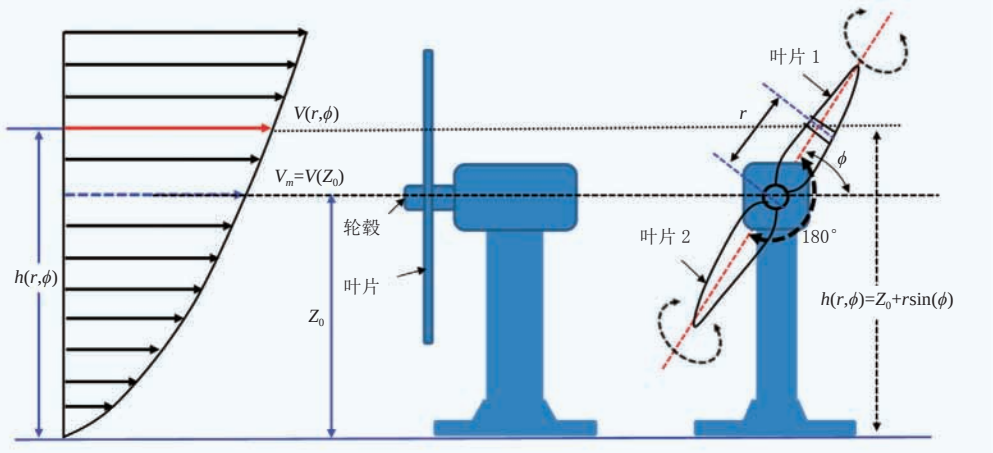


图3 IPC原理

（三）应用风险点

IPC 主要存在以下应用风险点：

（1）因为需要额外的反复变桨，变桨系统在 Mz 方向的疲劳会增加，少则达 20%~30%，多则可达 50% 以上。因此，需要对变桨轴承等关键部件进行加强，或限制 IPC 开启的条件。

（2）对于传感器测量的不确定性，需要在设计时予以考虑。

（3）作为一项辅助控制技术，需要在控制上做好权限管理，避免干扰原有的控制系统。

（4）作为一项降载技术，一旦失效则无法保证机组继续按原有的方式运行，因此，需要对其进行监控，并考虑失效后的应对措施，如降功率运行，或者停机。

二、激光雷达前馈辅助控制技术

（一）技术原理

利用机舱上的激光雷达，可以测量来流方向与风轮存在一段距离处的风速，从而提前获知未来几秒至几十秒的风速。利用这个信息，机组可以提前执行相关控制动作，以降低风速变化带来的影响。目前，激光雷达前馈技术（其控制逻辑见图 4），主要通过变桨控制进行降载，极少用于扭矩控制来提高发电量（提升效果小，但对传动链影响大）。

（二）效果分析

激光雷达前馈控制技术，通过提前变桨动作来降低风速突然变化带来的载荷波动，其降低推力方向疲劳载荷和极限载荷的效果如表 3 所示。

（三）应用风险点

激光雷达前馈控制技术主要存在以下应用风险点：

（1）对于激光雷达测风的不确定性，以及风速传播过程的演化影响，都需要在设计时予以考虑。

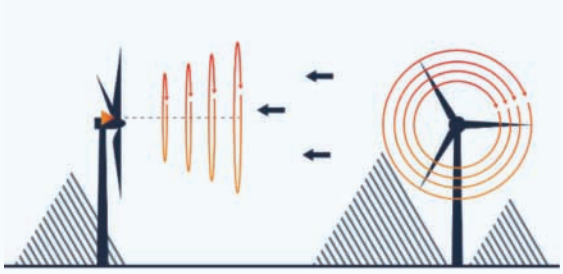
（2）作为一项辅助控制技术，需要在控制上做好权限管理，避免干扰原有的控制系统。

（3）作为一项降载技术，一旦失效则无法保证机组继续按原有的方式运行，因此，需要对其进行监控，并考虑失效后的应对措施，如降功率运行，或者停机。

三、塔架净空监控技术

（一）技术原理

随着叶片尺寸的增大，叶片柔性逐渐增加，变形量也随之增大，使叶片与塔架的距离越来越小，威胁到机组的安全运行。为此，在设计上会增加叶片选材的硬度（用碳纤维替代玻璃纤维）、增大风轮的仰角和叶片的锥角等。塔架净空监控技术（其原理见图 5）能够实时监控叶片与塔架的最小距离，当其小于设定的阈值时，进行变桨或执行停机保护操作。



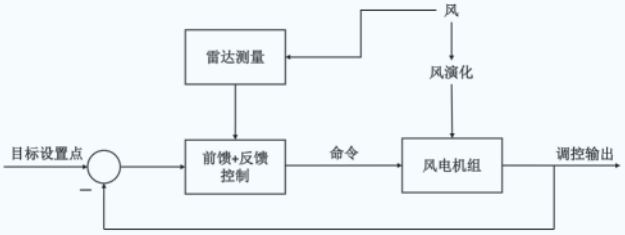


图4 前馈控制逻辑

表3 激光雷达前馈技术降载效果

载荷分量	降低幅度
叶根 My 疲劳载荷	5%~20%
塔架 My 疲劳载荷	5%~10%
塔架 Mxy 极限载荷	10% 以上 *

* 当极限载荷出现在阵风工况时

目前，叶片到塔架的测距手段主要有激光测距和图像识别两种：

（1）激光测距主要包括三角法、相位法和脉冲法。其中，通过安装在机舱上的脉冲式激光测距仪进行测距的脉冲法，应用较为广泛。

（2）图像识别技术通过识别摄像头拍摄的图像得到叶片和塔架的外轮廓，并以此分析实际物理距离。

（二）效果分析

塔架净空监控系统的应用，在不考虑发电量损失的情况下，几乎可以无限保障净空的安全性。但为了兼顾发电

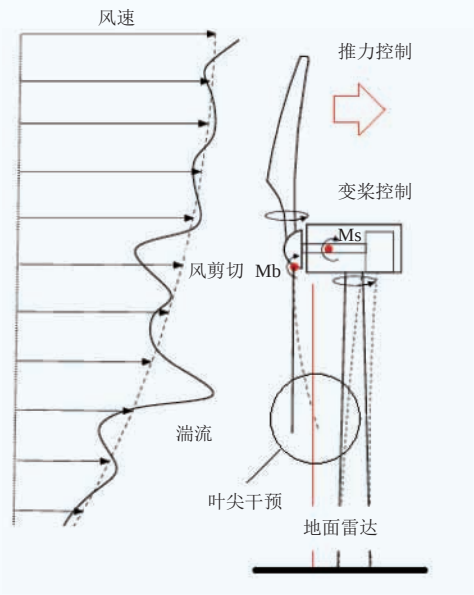


图5 塔架净空监控系统原理

量和叶片变形量，通常会控制监控系统启动的次数。从目前大容量海上风电机组的应用效果来看，提高净空值0.5~1m（约占总变形量的5%），即可满足塔架净空的要求，同时对发电量的影响小于1%。

（三）应用风险点

塔架净空监控技术主要存在以下应用风险点：

（1）对于净空监测所用传感器的不确定性，需要在设计时予以考虑。

（2）技术自身必须有监控以及失效后的应对措施，如降功率运行，或者停机。

总结

根据具体场址条件进行定制化设计是降本增效的一个趋势。为了提高塔架定制化的收益，本文介绍了两种特定场址塔架载荷分析的方法以及三种可用于塔架降载的技术，分析结果显示其对塔架载荷的降低均具有一定效果，若能结合使用，至少可以降低10%以上的塔架载荷，进而降低塔架重量5%以上，降本效果显著。但新方法和新技术的应用是一把“双刃剑”，需要同时关注应用的收益和风险。

（作者单位：北京鉴衡认证中心有限公司）

南高齿 齿轮箱与动力传动系统解决方案专家

南高齿风电信息化齿轮箱全生命周期管理系统包含多个智能信息化可扩展模块，在推动互联网技术与用户需求对接的基础上，实现大数据采集应用以及产品的信息化，为客户带来优化生产水平、管理效率、安全性能和盈利水平的一体化智能解决方案。

定制化浪潮下风电机组设计关键技术分析

文 | 胥昂

我国的风电行业完成了从标杆电价到竞价，再到平价的模式转换，电价下探带来的主要效应就是开发商对于投资的要求更加严格。由于在整个风电场的投资构成中，机组占据较高比重，因而降低机组成本成为行业极为重要的一项工作。按照行业发展和技术演进的趋势，可以将机组定制化简单划分为三个阶段：

第一阶段：机组标准化。对于一款机组的设计，从基础、塔筒到机舱采用一套标准化图纸，实现将相同的配置应用于不同的风电场。在这个阶段，机组的设计依据 IEC 较早版本的标准，在校核安全性时，只考虑年平均风速、年平均空气密度、15m/s 的湍流强度特征值等少数风能资源参数。

第二阶段：机组定向优化。在标准化的机组设计完成后，针对不同风电场的差异化风能资源条件，可以对塔筒与基础进行定向优化。这是风电行业目前正在经历的阶段。在这个阶段，机组设计基于的 IEC 标准不断更新，同时分扇区的疲劳载荷评估方法也获得了工程化的应用，机组实现定向优化的前提是风能资源团队能够提供足够丰富的输入参数。因此，风能资源团队需要准确评估不同扇区、不同风速段下的风速、湍流强度等参数，并将其提取出来。

第三阶段：机组定制化。标准化设计的机组虽然能够在塔架、基础等方面进行优化，但对于发电机、主轴承、叶片等重要部件却很难实现定制化改动。因此，最适用于某个风电场的机组一定是从设计阶段开始就以风电场的实际情况为设计边界，并且可以使适应性、成本以及发电能力达到最优平衡的定制化产品。以往，单个风电场的体量很难支撑一款机组的定制化开发成本，但在现今动辄几百万千瓦的基地化开发模式下，可以考虑将机组的开发成本均摊到风电场的开发成本中。在这种完全定制化的开发模式下，进行发电机、主轴承等机组大部件的定制时，需要输入更多、更精细化的风能资源条件，特别是以往不被重视的温度、湿度、雷暴、沙尘等气象环境条件，以及风速、湍流、空气密度等常见参数的联合分布。可以说，定制化机组开发的最初阶段就是风能资源、气象条件的精准化评估和输入阶段。

从上述三个阶段来看，随着机组定制化程度的不断加深，需要考虑的设计因素及输入条件将更多，对承担风况与环境条件输入的风能资源团队要求也更高。本文结合现阶段行业

图1 风能资源定制化中的风参输入关键流程节点

的相关研究成果和经验，分析了影响机组定制化的风能资源关键技术，并针对机组定制化开发流程提出了初步设想。

机组定制化场景下的风能资源关键技术

从整体工作流程来看，对风能资源评估准确性影响比较大的分别是测风数据的获取环节、排除风险后的可利用区域识别环节、软件的仿真以及发电量测算环节（图 1）。在测风数据获取环节，随着机组设计要求的不断提高，需要采用更精细的测风设备来获取更精细化的输入，同时也要更多关注短期数据以及缺失较多测量数据的处理。在风险识别环节，除了依靠大量的人工经验判断，还需要利用科学的手段形成科学化、工具化的判断方法；在软件仿真与发电量评估环节，由于仿真软件是由国外引进，即使发现存在模拟不准确的情况，也无法及时在源头上加以改进，只能依靠工程经验进行修正。特别是在大型风电场尾流模型上，现有模型的尾流评估结果与实际情况的偏差能够达到 50% 以上。

因此，就风能资源支撑而言，只有不断提高上述不确定性较大环节评估的准确性，才能在机组的定向优化甚至定制化开发层面保证设计成果的可信度。

一、测风设备的选取

在测风环节，以往风能资源专业更加关注测风代表性的问题。比如，将虚拟测风塔技术与激光雷达及传统的桁架式测风塔结合形成组合测风方案，在测风准确度、成本以及效率方面给出最优解决方案。但随着机组定制化程度的不断加深，测风团队开始将目光投向测风设备的选取。在 IEC 标准中有 5 种极限风况需要采用秒级数据进行评估，而目前国内的主流测风设备均只能提供 10min 级别的测风数据。从金风科技风能资源团队对收集到的有限秒级数据的分析结果来看，一些真实场景下的极限风况相比于 IEC 的设计标准存在明显的差异（图 2），如果基于秒级测风数据对极限风况进行条件输入，就能够有效降低机组的极限载荷。对于大部分受极限载荷影响较大的塔架，其重量与部分极端风况相关。比如，对于 90m 塔架顶段，当极限载荷由 ECD 风况主导时，若阵风幅值由标准中的 15m/s 变为实际测算的 14m/s，塔架重量将减轻约 2~3t。

因此，要想实现更加精准的安全性评估或者机组成本的进一步下降，在测风阶段需获取秒级测风数据。

二、短期测风数据插补

关于短期测风数据的插补，业界的共识是测风时间越长，数据插补的偏差就越小，因此，推荐的测风时间长度都在一年以上。但是对于一些只能利用激光雷达进行短期补充测风的场景而言，测量设备、测量时长的差异，甚至相同测量时长下起始月份的不同都会对风能资源评估的准确性产生影响。

以金风科技测风团队的测试方法及结果为例，该团队首先建立了一个测风的标准场，按照相关标准对市场上的主流激光雷达品牌进行同期对比测量。结果显示，不同品牌、不同测风原理的雷达在利用测风塔数据进行插补时，采用不同的方法产生的偏差也各异。因此，为提高雷达测风数据的准确性，需要结合设备品牌和测风原理来选择相应的插补方法。此外，针对不同测量时长的数据插补方法和偏差，该团队也进行了详细分析。从结果来看，当短期测风时长达到 3 个月时，插补到全年的偏差会出现明显下降；随着测量时长继续增加，偏差的下降幅度越来越小。因此，建议设定最短测风时长为 3 个月。最后，该团队还对相同测量时长、不同起始月份的数据插补方法和偏差进行了验证。从结果来看，对于 3 个月的测量时长，选择 9 月到 11 月插补的偏差最小；对于 4 个月的测量时长，则是 8 月到 11 月的偏差最小。

三、风速与湍流的垂直外推

在机组的定制化输入过程中，风能资源团队经常要面对类似将 70m 高度的风速和湍流强度推算到 90m 的情况，单纯依赖 CFD 软件模拟会产生较大的偏差。因此，需要先将测风塔处的风速和湍流推算准确后，再进行 CFD 仿真。某项针对不同湍流垂直外推方法误差的研究结果表明，在多组理想数据中，采用不同方法进行湍流垂直外推的偏差不同。因此，在进行湍流垂直外推的过程中应采用合适的方法，以保证输入造成的风况偏差最小。

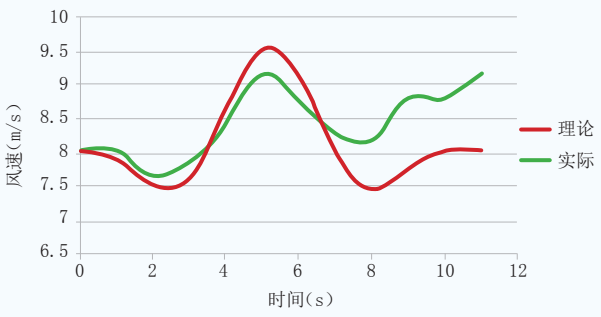


图2 某风电场实测极端运行阵风（EOG）与标准情况的对比

四、风速的长期订正

风速的年际变化对发电量评估结果的影响非常大，行业内的常规做法是根据中尺度的长期数据将测风时段订正到 20 年的平均水平。图 3 为利用 4 组 7 年以上实际测风数据进行不同方法长期订正模拟的误差统计情况。该研究结果表明，不同订正方法对国内较为复杂风能资源环境的适用性存在明显差异。

五、地形风险识别

我国多山地，抛开南方地区不谈，即使在新疆、内蒙古等北方省份，仍然存在很多地形复杂的区域。对于建在这些区域内风电场的风能资源评估来说，在测风塔数量不足的情况下，单纯依靠 CFD 软件的仿真模拟，会产生非常大的偏差。

以新疆某风电场为例，场区内某些机组在实际运行期间的风速和发电量远远低于其他机组，而湍流强度又明显高出，这些情况在软件的仿真结果中并没有很好地得以体现。针对此类在风电行业内极为常见的问题，除了依靠实际经验来判断以外，没有更好的解决办法。从工程经验的角度可以简单将影响归类为高山影响、悬崖影响、施工影响等多种因素，基于地形分析结果形成地形风险判断数据库，针对风电场的实际地形情况实现自动化的风险地形识别与标记。

六、CFD仿真与发电量测算

在机组定制化流程中，CFD 仿真是最重要的一环，每一个机位点的风能资源情况都需要利用 CFD 仿真软件进行推算。目前，国内风能资源评估领域应用的 CFD 仿真软件基本都不是国产的，对于某些场景，特别是复杂地形的风速模拟和大型风电场的尾流模拟均存在比较大的偏差。然而，由于核心算法掌握在国外软件厂商手中，使用者只能通过大量工程经验对结果进行人为订正。为此，我国开展了大量的自主研发工作。例如，金风科技自主开发的集成化平台“风匠”，不仅实现了 CFD 仿真，还集成了包括数据自动处理、地形图自动处理、风能资源评估报告自动生成、设计成果三维可视化等数字化辅助功能（图 4），在复杂地形的发电量仿真与大基地尾流模拟方面，均实现了对国外软件不同程度的超越。

综上所述，为了实现平价时代机组定向优化，甚至是定制化开发，需要在测风设备选取、测风数据处理、CFD 仿真和发电量计算方面进行大量的经验和技术储备。只有在保证风能资源输入条件准确的前提下，才有可能通过机组的定制化来降低风电场投资成本。

机组的定制化开发展望

伴随平价时代的到来，从长远来看，可开发的资源水平是不断下降的。开发商为了保障收益，会向整机厂商施加

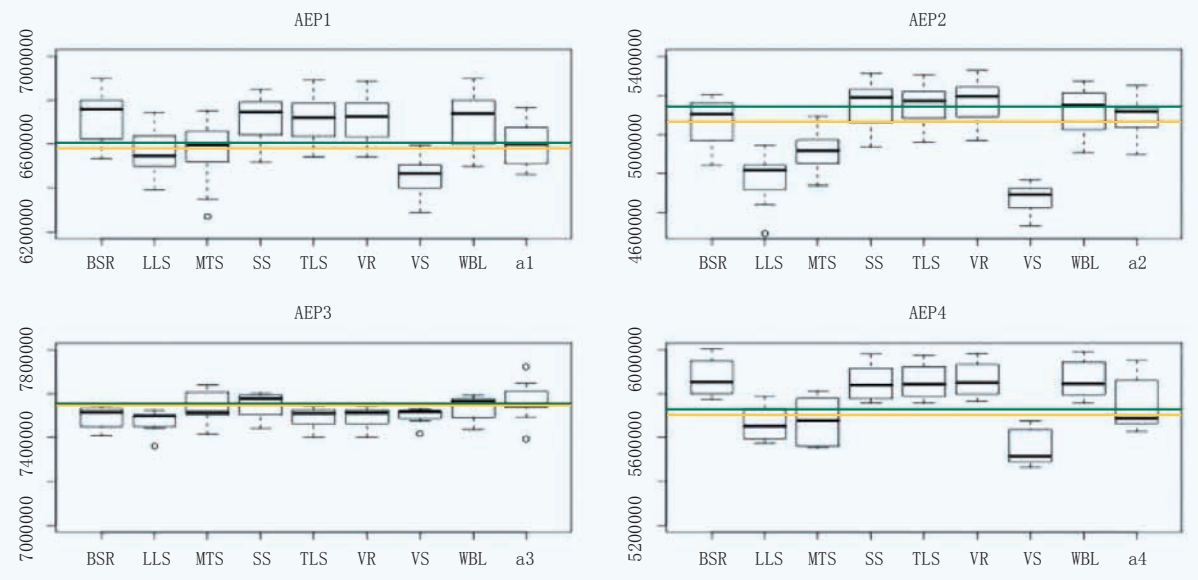


图3 不同方法的风速长期订正偏差
（横坐标为订正方法，纵坐标为发电量偏差）

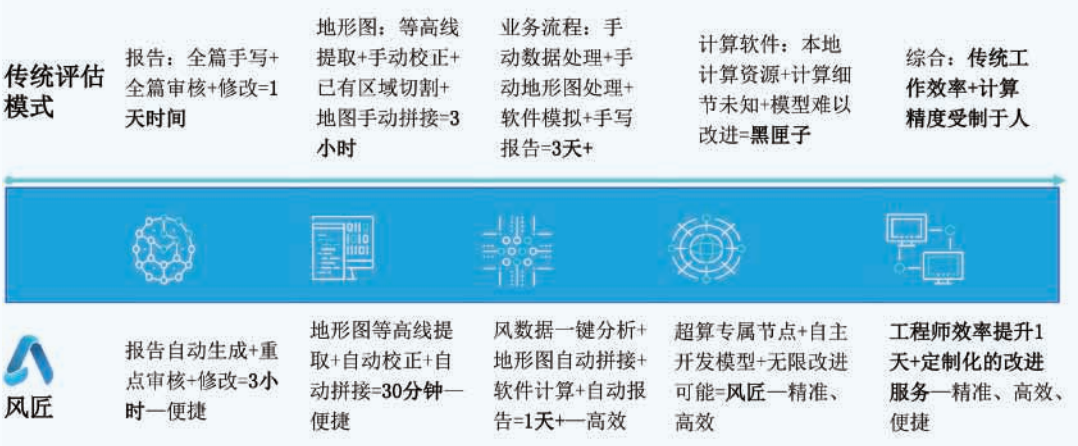


图4 “风匠”与传统风能资源评估模式的对比

图5 机组定制化开发流程设想

更多的压力。整机厂商也面临着成本、适应性、发电能力三者难以平衡的困扰，标准化开发后的定向优化显然越来越难以适应市场的需求。未来，针对特定场址的机组定制化开发模式将成为最优解。

本文提出如图5所示的一种可行流程设想。在该流程中，开发商与整机厂商需要紧密合作，共同开展规划选址、测风、限制因素排查等工作。在此过程中，双方的资源开发与数据积累能力，是找到适合大规模开发且满足收益要求资源区域的关键。此外，整机厂商的技术实现能力至关重要，即使在开发的最初阶段将设计边界规划得很好，实际可操作性、产品规划能力、技术创新能力、软硬件能力、供应链成本控制能力等都会对最终的设计效果产生巨大影响。而不论是产品的适应性规划，还是发电能力规划，都离不开对目标区域风能资源条件的精准把控。

结语

为保证平价时代风电开发商的收益率，整机厂商正在通过对机组的定制化设计来尽量压低机组的成本。但是随着主机价格和塔架重量的不断降低，市场上出现了越来越多关于安全性的质疑。对于整机厂商来说，产品的定制化一定是基于可靠的输入条件与深入的技术研究实现的，不论是在现今的机组定向优化，还是未来的机组定制化开发场景下，风能资源的精准化输入都将是非常重要的一环。精准的输入离不开长期的积累与投入，只有在测风设备选取、测风数据处理、风险地形识别、CFD 仿真和发电量计算方面均进行大量的经验和技术储备，才可以将风电场的真实风能资源条件精准还原、定向输入，为现阶段与未来阶段的机组定制化开发与优化提供强大的支撑。

（作者单位：新疆金风科技股份有限公司）

基于资源评估的在役风电场增功提效方案制定探究

文 | 薛浩宁，王海斌，马剑辉，刘斌

我国在役风电场市场体量庞大，为保证并尽量提升在役风电场的收益，基于对各个影响因素（风能资源条件、风电机组性能、运维能力、限电等）的综合评估实现风电场的增功提效非常必要。风电场增功提效方案制定的前提在于，充分了解在役风电场的风能资源和机组运行情况。因此，本文基于这两个层面，提出在役风电场增功提效方案的制定方法，以达到提升在役风电场效益的目的。

在役风电场资源评估

目前，评估风电场运行情况的指标主要包括时间可利用率、能量可利用率、故障率、功率曲线符合度等，但是通过这些指标并不能得出风电场发电量低的具体原因或提质增效的方向。针对此问题，在对在役风电场进行评估时，不仅要分析风电场的主要运行指标，还要分析指标背后的影响因素。在役风电场评估可以理解为通过对在役风电场资源（风能资源与机组资源）的评估，分析风电场发电量的影响因素。

一、风能资源分析

在风电场建设前期，主要依靠测风塔的数据进行风能资源评估。而对于在役风电场，虽然可以通过每台机组采集的实时风速、风向数据进行风能资源分析，但由于机组采集的数据与自由流风速存在定义上的差别，因此，需要运用有效的手段校正机组的风速、风向数据，还原风电场真实的流场情况，订正前期风能资源评估的结论，挖掘风特性对机组发电性能的影响。

例如，南方某风电场 LK3 号机组和 LK5 号机组频繁出现机舱振动故障。基于机组实际运行的数据还原场区内流场

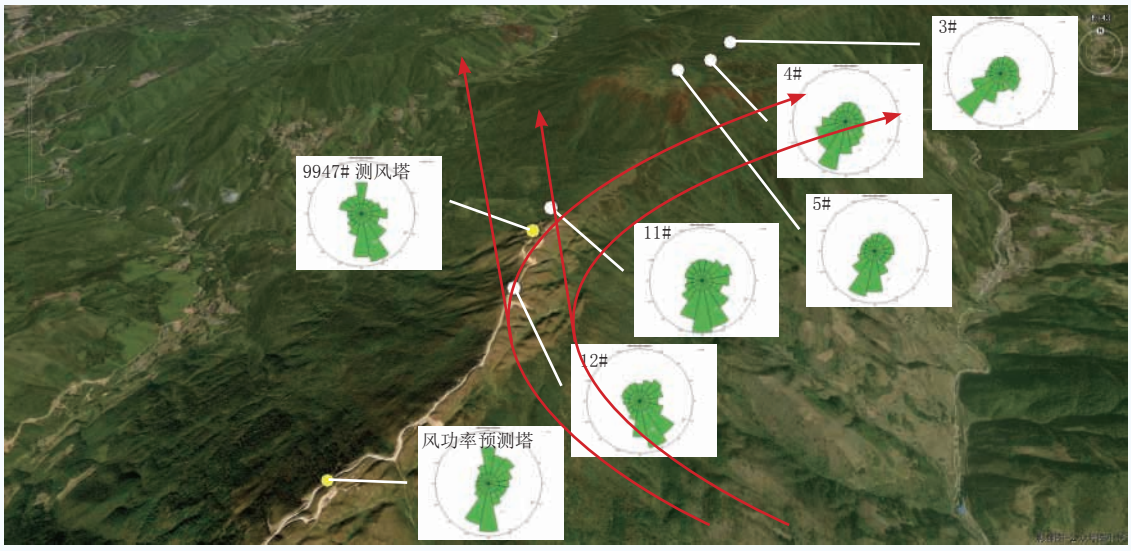


图1 根据机组实际数据还原现场流场

情况发现，场区内出现了风向偏转的流场（图 1），因而导致机组机舱振动故障的发生。因此，需要根据实际风况进行控制策略调整，保障机组的安全性和经济性。

二、机组资源分析

机组作为将风能转换为电能的机械装置，对其的评估主要包括功率曲线性能和运行情况。风电机组的功率曲线性能分析分为两个层面：对于具备 IEC61400-12-1 标准测试条件的机组，按照标准进行验证，并对比实际功率曲线和担保功率曲线的符合度；对于不满足验证条件的机组，从影响性能的参数（主要为偏航控制、桨角控制、K_{opt}、启停机控制、异常散点等）入手，表征机组的功率曲线水平，也就是说在评估过程中不仅要评估功率曲线的表现，也要评估影响功率曲线表现的因素。

如图 2 所示，在对某收购项目尽职调查过程中发现，虽然风电场实际的功率曲线符合度达到 99%，但在 5~7m/s 风速区间段内功率曲线明显偏离理论值。由图 3 可知，功率曲线散点在此区间段出现明显的降低。由图 4 可知，造成此种现象的主要原因为运行期间机组转速长时间停留在跳转

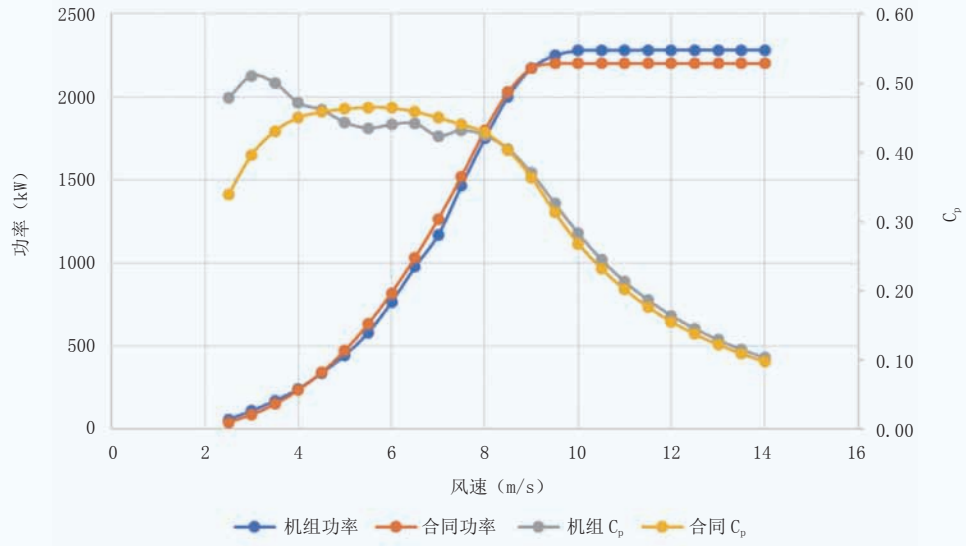


图2 某风电场实际功率曲线表现

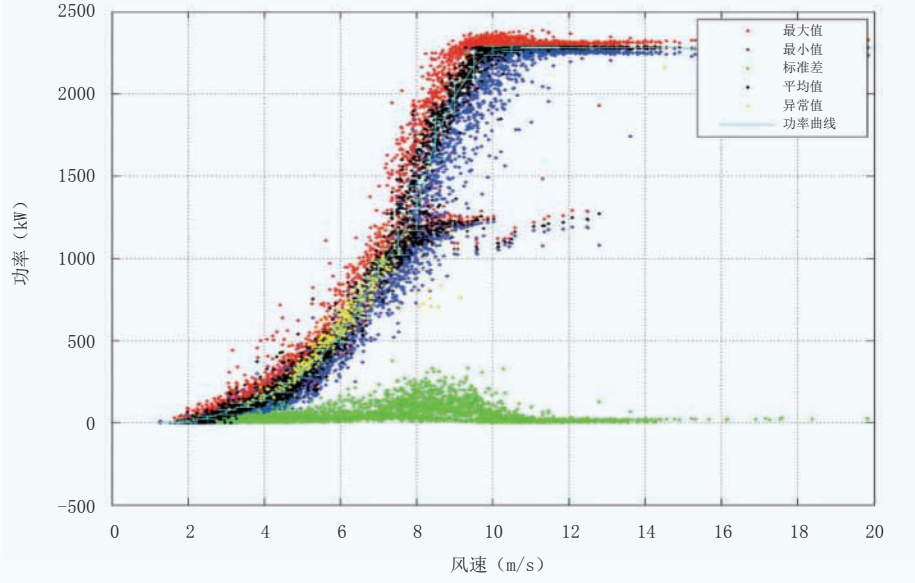


图3 功率曲线散点

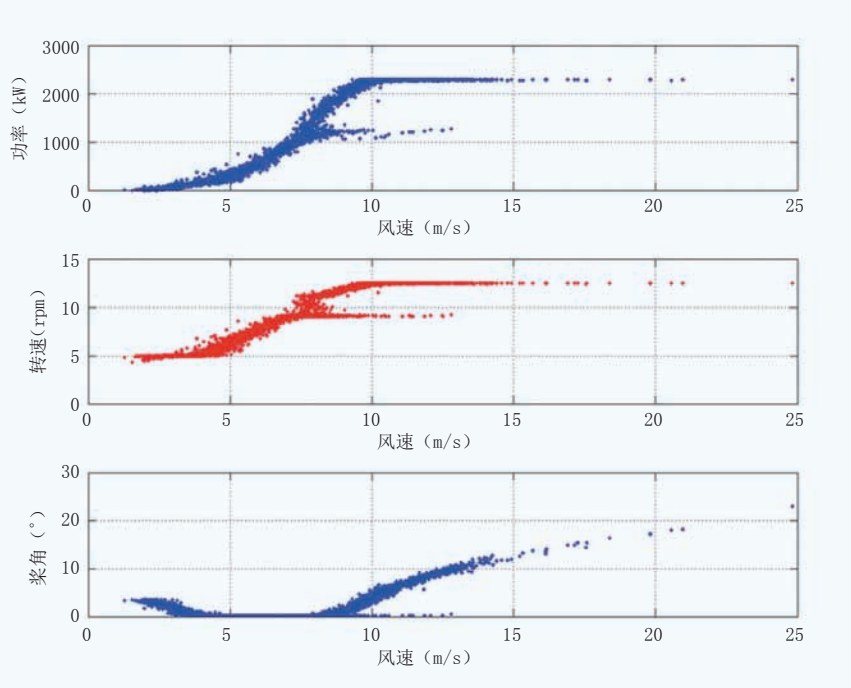


图4 控制系统特征散点

速下限。针对此问题，采取的解决方案主要是核查跳转速控制逻辑并进行优化。

应结合运行时间和运行能量分析机组运行情况，首先判别哪些情况影响风电机组的利用时间，再分析这些情况是否为影响发电量的主要因素。风电场的实际理论发电量为实际发电量、并网损失（限负荷、自降容、性能下降等）、停机损失（限负荷、故障、维护、无故障）、无数据损失之和。其中，对于无数据部分，采用数据最优插补的方法进行补充后，可算得其损失的发电量。

三、“风+机”的评估模式

风电机组的实际理论发电小时数主要与风能资源或机组性能有关，而实际发电小时数则主要受机组性能或运行情况影响。结合运行年的实际理论发电小时数与前期评估的理论发电小时数来订正风电场 20 年的产能水平，可以达到深度评估资产价值的目的。

定制化增功提效方案

通过对在役风电场资源的深度分析，统计电量的影响因素，并对其进行分类，可为风电场制定定制化的增功提效方案。本文通过对在役项目问题的统计，提出以下三类增功提效方案。

一、保障应发电量

应发未发电量是指风电场风电机组由于运行的问题损失的电量，如并网损失（限负荷、自降容）、停机损失（限负荷、故障、维护、无故障）。

如图 5 和图 6 所示，某风电场半年度的待机损失达到 87h，其中无故障损失达到 72h，占理论发电小时数的比例超过 6%。针对该损失，可以进一步分析风电场本身管理或制度是否存在问题。

二、优化机组性能

性能损失是指风电机组的实际功率曲线未达到担保功率曲线的水平。对于复杂地形无法按照 IEC61400-12-1 标准进行功率曲线验证的情况，可以依据上述评估过程中的性能参数，在充分了解风能资源情况的基础上，验证机组功率曲线是否达到最优的水平。

如表 1 所示，某风电场 5# 机组偏航误差为 -6°，经过调整将偏航误差控制在 -1°后，与附近 6# 机组相比，发电量提升 1.54%。通过数据挖掘得到偏航误差，具有成本低、实施周期短、效果明显的特点。

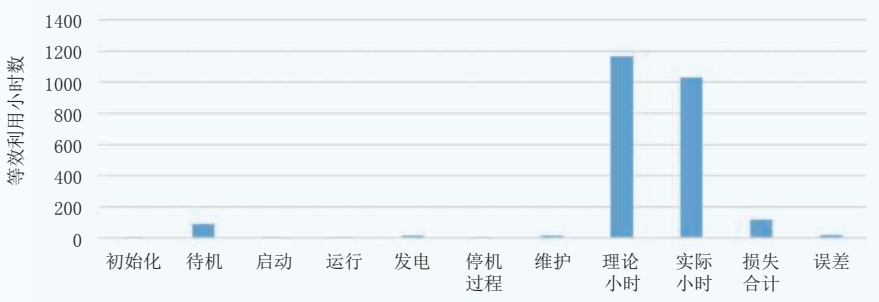


图5 某风电场全场能量分布

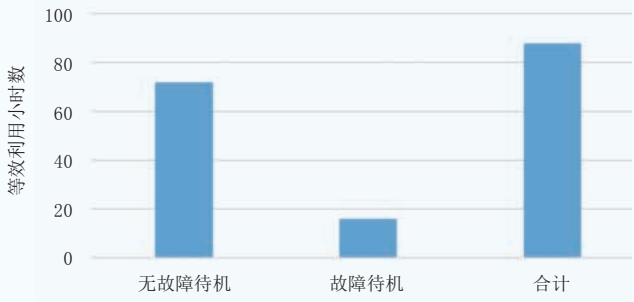


图6 待机能量分布

表1 某风电场5#机组调整偏航误差后的发电量提升比例

	优化日期前平均每天实际发电量	优化日期后平均每天实际发电量
5# 机组	20511 kWh	24152 kWh
6# 机组	21884 kWh	25353 kWh
差异	-1373 kWh	-1201 kWh
	-6.27%	-4.74%
综合提升量	1.54%	

三、提升设计性能

设计性能提升是指通过一定的手段提升机组的额定功率、风能资源利用能力，以达到发电量提升的目的。由于风电场建设后的风能资源情况会与前期测风塔代表的风速、风向、湍流、入流角、切变等参数情况存在差异，通过对各台机组实际运行中的风能资源参数进行再次评估和输入，可以实现性能升级，包括：

1. 二次定制化开发

依据风能资源参数，在不改动硬件的前提下，对转速、功率、控制策略进行定制化开发，提升风电机组性能。

2. 移机

找出风电场内低效机组，并寻找实际运行后风能资源较优的区域，进行机组移机方案的设计。此外，由于移机会增加成本，需视投资收益率的测算情况进行决策。

3. 老旧机组升级

依据对全场风能资源的准确评估为载荷计算提供输入，考虑采用更换、延长叶片，提升塔架高度等方式进行改造升级。

4. 全场优化

全场优化是指对风电场尾流损失进行优化。优化的前提为对尾流损失的准确评估，对于在役的平坦地形项目，需要依据机组瞬态数据评估实际的尾流损失。经过对多个项目的测算发现，平坦地形项目的实际尾流损失远远大于商业软件评估的结果。优化的方法为改变首排机组的偏航角度，达到虽然首排机组出力不是最优，但是全场出力为最优的效果。

总结

在役风电场增功提效的前提是准确分析和评估风电场的运行状态，通过“风 + 机”结合的分析模式找到影响风电场发电量的问题，对症下药。本文依据在役风电场的特点，提出了针对发电量的评估方法和体系，以及依据评估的结果制定增功提效方案的方法。平价时代对风电行业提出了新的要求，希望本文能够给行业探索在役风电场的精准评估方法带来启发和思考。

（作者单位：北京金风科创风电设备有限公司）

平价时代风电项目投资特点与趋势

文 | 徐燕鹏

随着新一轮“抢装潮”的结束，风电将迎来全面平价时代，平价上网将成为项目开发的“标配”。新的市场场景，对平价项目的发电效率提升、度电成本下降提出了更高的要求。因此，满足收益率标准要求项目的开发难度将上升，在前期阶段需要进行更精细、更精准的收益技经测算。原有先圈地、后建设的粗放式开发模式已不再适用于平价项目，采用精细化的开发模式将成为必然之势。在平价场景下，项目开发工作将围绕“三好两准一控制”六个要素展开，即“好的资源 + 好的机组 + 好的设计方案”“项目投资算准 + 财务评价测准”以及“做好建设过程成本控制”。

鉴于平价时代技经工作的重要性越来越突出，本文以技经分析为出发点，梳理归纳平价时代风电项目的投资特点及发展趋势。

平价时代风电项目特点

从技经角度来看，平价风电场必须具备“大、长、低、运、新”五大特点，每个特点对应两个技经控制方向。两“大”，即项目规模扩大化、单机容量大型化；两“长”，即整机叶片长、塔架高度长；两“低”，即塔架重量低、融资利率低；两“运”，即风电场的集中运维、智慧运维；两“新”，即风电场模式创新、项目前期技经测算工具创新。

一、“大、长、低、运、新”之“大”

（一）项目规模扩大化

在其他条件不变的情况下，风电项目规模越大，单位千瓦投资越低。投资优化主要来自于前期、设计及升压站等公共成本降低，规模效益可有效降低总体投资，从而提升整体收益。此外，对大容量项目或将多个项目打捆进行风电机组设备招标，可提高开发商的议价权，降低设备采购成本。

以 50MW 项目为基准，如表 1 所示，若项目容量增至 100MW，单位千瓦投资可降低 418 元；若扩容到 400MW 基地规模水平，单位千瓦投资可降低 713 元。投资的降低对项目收益的提升效果明显，当容量由 50MW 扩容至 400MW，项目全投资内部收益率（IRR）将由 9.33% 提升至 10.60%，平准化度电成本（LCOE）则由 0.3277 元 / 千瓦时降低至 0.3085 元 / 千瓦时。

从市场实际发展情况来看，在标杆电价时代，单体项目装机容量基本以 50MW 为主，而目前基本以大容量项目开发为主，比如以风电基地形式开发的乌兰察布 600 万千瓦项目、上海庙基地项目等。装机容量的增加，使项目单位造价降低，可在满足基准收益要求的前提下实现平价上网。

（二）风电机组单机容量大型化

风电机组单机容量的大小直接决定着同等装机规模所需要的风电机组台数，进而影响风电场道路、线路、基础、

表1 风电项目造价的规模效益

项目容量（MW）	投资成本（元 / 千瓦）	变动幅度	全投资 IRR	变动幅度	资本金 IRR	变动幅度	LCOE（元 / 千瓦时）	变动幅度
50	6520.99	/	9.33%	/	18.02%	/	0.3453	/
100	6102.77	-6.41%	10.10%	8.23%	21.24%	17.87%	0.3277	-5.11%
200	5917.07	-1.20%	10.19%	1.95%	19.80%	3.27%	0.3167	-1.23%
300	5847.18	-0.48%	10.45%	1.04%	20.67%	1.74%	0.3114	-0.68%
400	5807.03	-0.31%	10.60%	0.63%	21.15%	1.04%	0.3085	-0.42%

塔架等的投资。同时，在风能资源及土地资源紧缺的情况下，采用大容量机组还可解决风电机组点位不足等问题。

以仅考虑风电机组点位影响的同一项目为例，当机组单机容量由 2MW 增加到 4.5MW 时，项目投资成本显著降低（图 1），静态投资可降低 932 元 / 千瓦，全投资 IRR 可提升 2.4%，资本金 IRR 可提升 9%，LCOE 可降低 0.0468 元 / 千瓦时（表 2）。

从近两年的风电招标项目中也能明显发现这种变化，风电机组技术迭代速度加快，大型化趋势明显。据统计（图 2），2019 年，中国新增装机的风电机组平均单机容量为 2454kW，同比增长 12.4%，主流机型的单机容量已从 2MW 级升至 3MW 级。

二、“大、长、低、运、新”之“长”

（一）叶片加长，扫风面积增大

在同等风速情况下，风电机组的发电量与扫风面积成正比。以 3MW 机组为例，若叶片加长 5m，扫风面积可增加 0.81m^2/kW，年利用小时数可提升 208 小时，相当于投资节约 600 元 / 千瓦。因此，增加叶片长度可作为提升发电量的重要手段。据中国可再生能源学会风能专业委员会（CWEA）统计，2019 年，平均风轮直径增至 129m，较 2018 年的平均值增长 9m。

（二）塔筒加长（高）

在风速一定的情况下，切变越大、塔架越高的风电机组发电量越高。因此，在高切变地区，选择高塔架的经济性较好。在切变为 0.13 的情况下，3MW 机组的塔筒每增高 5m，年利用小时数可提升 26 小时。如图 3 所示，截至 2019 年年底，国内最大轮毂高度为 147m；平均轮毂高度达

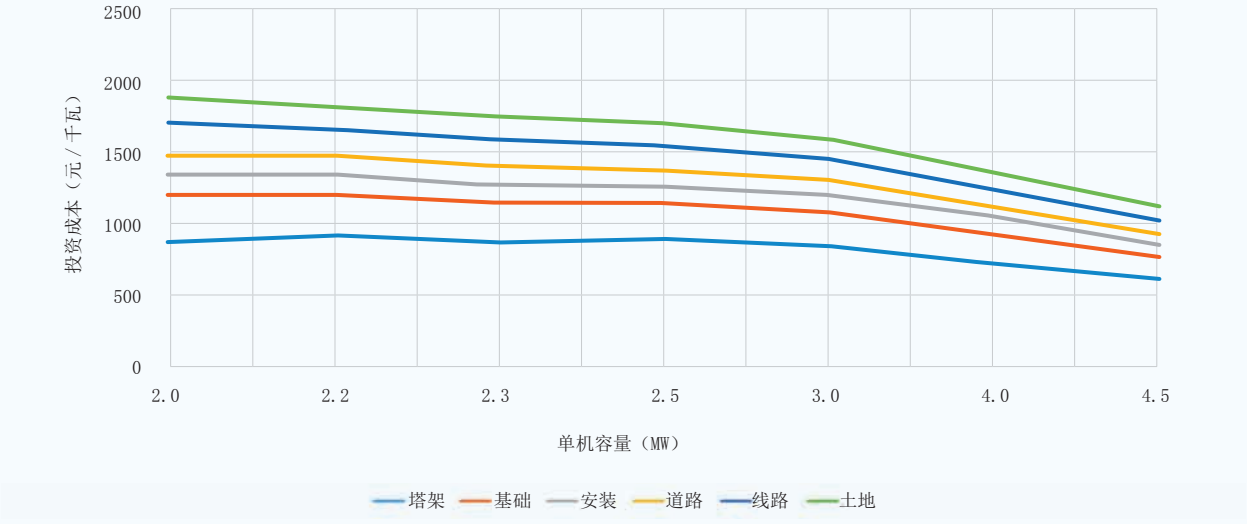


图1 采用不同单机容量机组的项目投资优化

表2 采用不同单机容量机组的项目经济指标

单机容量（MW）	台数	项目容量（MW）	静态投资（元 / 千瓦）	全投资 IRR	资本金 IRR	LCOE（元 / 千瓦时）
2.0	50	100	6449	9.28%	18.24%	0.3451
2.2	45	99	6375	9.45%	18.85%	0.3414
2.3	43	99	6279	9.67%	19.66%	0.3366
2.5	40	100	6221	9.82%	20.19%	0.3336
3.0	33	99	6073	10.18%	21.54%	0.3262
4.0	25	100	5767	10.97%	24.63%	0.3108
4.5	22	99	5517	11.68%	27.49%	0.2983

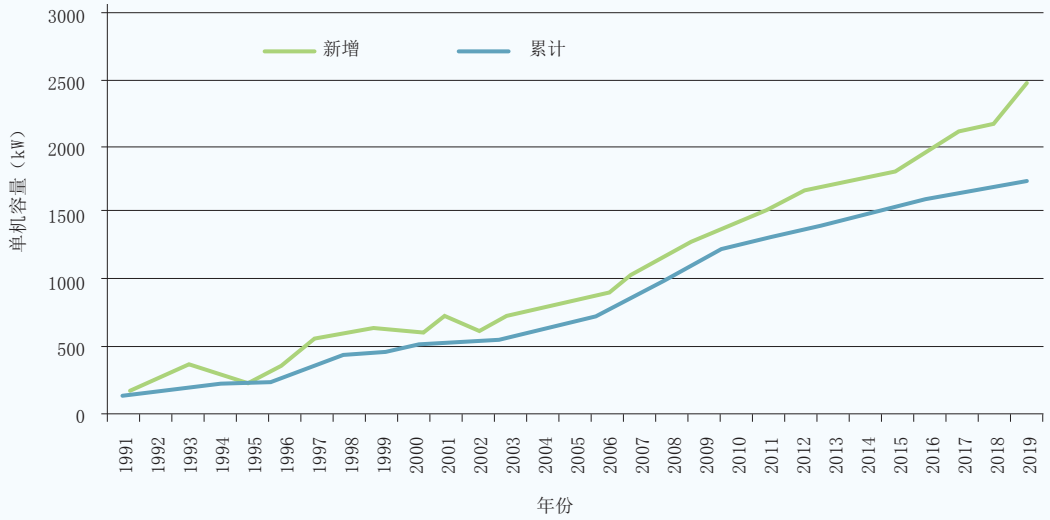


图2 1991—2019年全国新增和累计装机风电机组平均单机容量
（数据来源：CWEA）

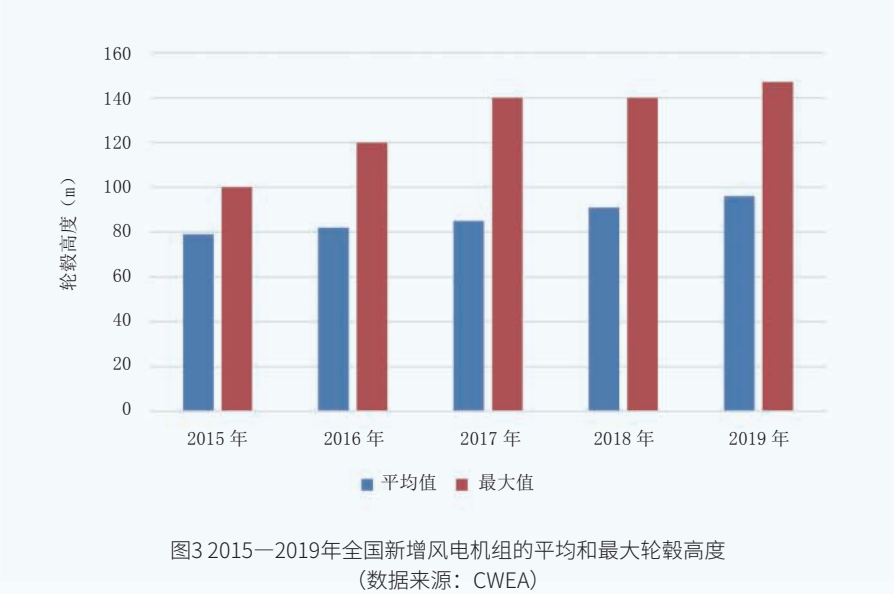


图3 2015—2019年全国新增风电机组的平均和最大轮毂高度
（数据来源：CWEA）

到 96m，比 2018 年增加 5m，增速明显。

三、“大、长、低、运、新”之“低”

（一）塔架重量降低

塔架越高，其理论重量会越大，但在风电场高度定制化的今天，在满足安全性的前提下，风电场塔架由所有风电机组通用到每个机位点根据风参进行定制化设计，可实现重量的大幅优化，满足塔架轻量化的要求。如表 3 所示，以 100m 高度的 2.5MW 机组塔架为例，相同高度下单机每优化 10t，价格可降低 20 元 / 千瓦，平均资本金 IRR 可提升 0.35% 左右，LCOE 可降低 0.0017 元 / 千瓦时。

（二）融资利率降低

融资包括建设期融资与运营期贷款还本付息，建设期

图4 贷款利率走势

表3 2.5MW机组塔架重量敏感性分析

塔筒重量（t）	变动幅度	全投资 IRR	变动幅度	资本金 IRR	变动幅度	LCOE(元 / 千瓦时)	变动幅度
174.4	/	14.34%	/	31.99%	/	0.2790	/
184.4	10t	14.23%	-0.77%	31.65%	-1.06%	0.2807	0.61%
194.4	20t	14.12%	-0.77%	31.30%	-1.11%	0.2824	0.61%
204.4	30t	14.02%	-0.71%	30.97%	-1.05%	0.2841	0.60%

表4 不同融资方式及利率对收益率的影响

	融资方案	变动幅度	全投资 IRR	资本金 IRR	变动幅度	LCOE（元 / 千瓦时）	变动幅度
贷款利率	4.90%	-10%	14.23%	33.35%	5.37%	0.2461	-12.33%
资本金比例	20%	/	14.23%	31.65%	0.00%	0.2807	0.00%
	30%	10%	14.23%	25.65%	-18.96%	0.2924	4.17%
还款方案	等额本金	/	14.23%	31.65%	0.00%	0.2807	0.00%
	等额本息	/	14.23%	33.08%	4.52%	0.2776	-1.10%

融资主要为建设期贷款利息，约占项目投资的 2%，即 130 元 / 千瓦左右，贷款利率主要影响资本金收益率。

从贷款利率变化走势（图 4）可以看出，历史贷款利率是逐步下降的。结合目前市场情况来判断，未来贷款利率仍会逐步下降。融资贷款利率越低，平价风电项目的开发就越容易实现。

不同融资方案对收益率的影响不同。如表 4 所示，贷款利率每降低 10%，资本金收益率相对变动 5.37%；资本金比例从 30% 降低到 20%，资本金收益率提升 6%；等额本息还款方案较等额本金高 1.43%。

四、“大、长、低、运、新”之“运”

在平价时代，投资商更加关注 LCOE，重视运营期的运维成本。智能化运维可实现各类资源的合理分配，提高运维效率，降低运维成本，有效减少人员配置，节约公共建设

支出。

通过技经分析测算发现，每减少一名运维人员，可以给项目收益带来相当大的影响。针对同一个风电场，在保持相同收益率的情况下，假设每名运维人员按工资 9 万元 / 年、60% 的福利费计算，每减少一名运维人员，等同于节约初始投资 24.6 元 / 千瓦，或提升年利用小时数 7.5 小时。

五、“大、长、低、运、新”之“新”

（一）模式创新

在平价时代，模式上的创新突破可给平价带来“增值”。以探究风电机组的“延寿”模式为例，目前国内整机设计寿命通常为 20 年，但风电项目永久征地年限为 50 年，并且在风电场设计中，风电机组基础、塔架、升压站等均按 20 年以上寿命设计，因而整机运行寿命限制会造成许多设计上的浪费。从国际经验来看，大部分项目的整机运营期可达 25 年，部分项目已在探索 30 年运营期。

关于国内常规风电项目延寿的研究结论（详见 2019 年第 11 期《风能》杂志）表明，项目延寿 1~10 年，其全投资收益率（所得税后）将由 7.54% 提高到 8.67%，资本金收益率将由 12.77% 增加到 14.22%。原本一些资源较差、投资成本高、在原有 20 年运营期满足不了平价收益要求的地区，通过延长运营期，可使项目收益率达到甚至超过 8%。此外，在保证 8% 收益率的前提下，延寿时间越长，上网电价越低。当延寿至 30 年时，上网电价可降低 0.0295 元 / 千瓦时，降幅比例为 7.8%。

（二）项目前期技经测算工具创新

在平价时代，为提高风电项目开发效率，需要在前期阶段就进行多方案迭代筛选，包括精准确定项目经济性，实现快速发电量评估、投资估算、多方案对比等一站式技经测算。因此，在测算工具上进行定制化与创新开发具有重要意义。

结语

通过本文的分析可以看出，“大、长、低、运、新”将是未来风电场实现平价上网的必由之路。但需要明确的是，平价上网不是风电发展的终点，而是全新的起点，未来风电发展的必然趋势是进一步市场化。因此，风电行业需顺应时势，克服发展中的困难，推动可再生能源产业加快步入新时代。

（作者单位：新疆金风科技股份有限公司）

摄影：刘璐

MOTION & CONTROL™

NSK

“技”源于“制造”，是NSK人百年制作经验和技能的累积；
“技”升华于“智造”，NSK人挥洒才智，充分运营NSK特有的核心技术和工艺，是科技向产品的转化。
每一个NSK产品都是“技”的体现和结晶，此为NSK的“技”之所在。

保障风力发电机组稳定可靠运行，将风能转化为电能，年复一年风雨无阻

无外圈轴承 - 风力发电增速机用

齿轮内径面直接作为轴承的滚道使用，从而省略了外圈的设计。该设计能够有效解决外圈打滑的问题，同时通过轴承特殊配列的设定，还可实现更高的承载能力。提高该部位的运转可靠性。

NSK微信公众号

恩斯克投资有限公司（NSK中国总部）　www.nsk.com.cn

地址：江苏省昆山市花桥经济开发区恩斯克路8号　电话：+86-512-57963000

产业机械服务热线：400-828-8773

广告

CHINA
WINDPOWER
2021
18-20 October
Beijing,China
CHINA
WIND
POWER
2021北京
国际风能大会暨展览会
CHINA WIND POWER 2021
2021年10月18-20 日 中国国际展览中心（新馆）
October 18-20, Beijing, China
China International Exhibition Center(New Venue)

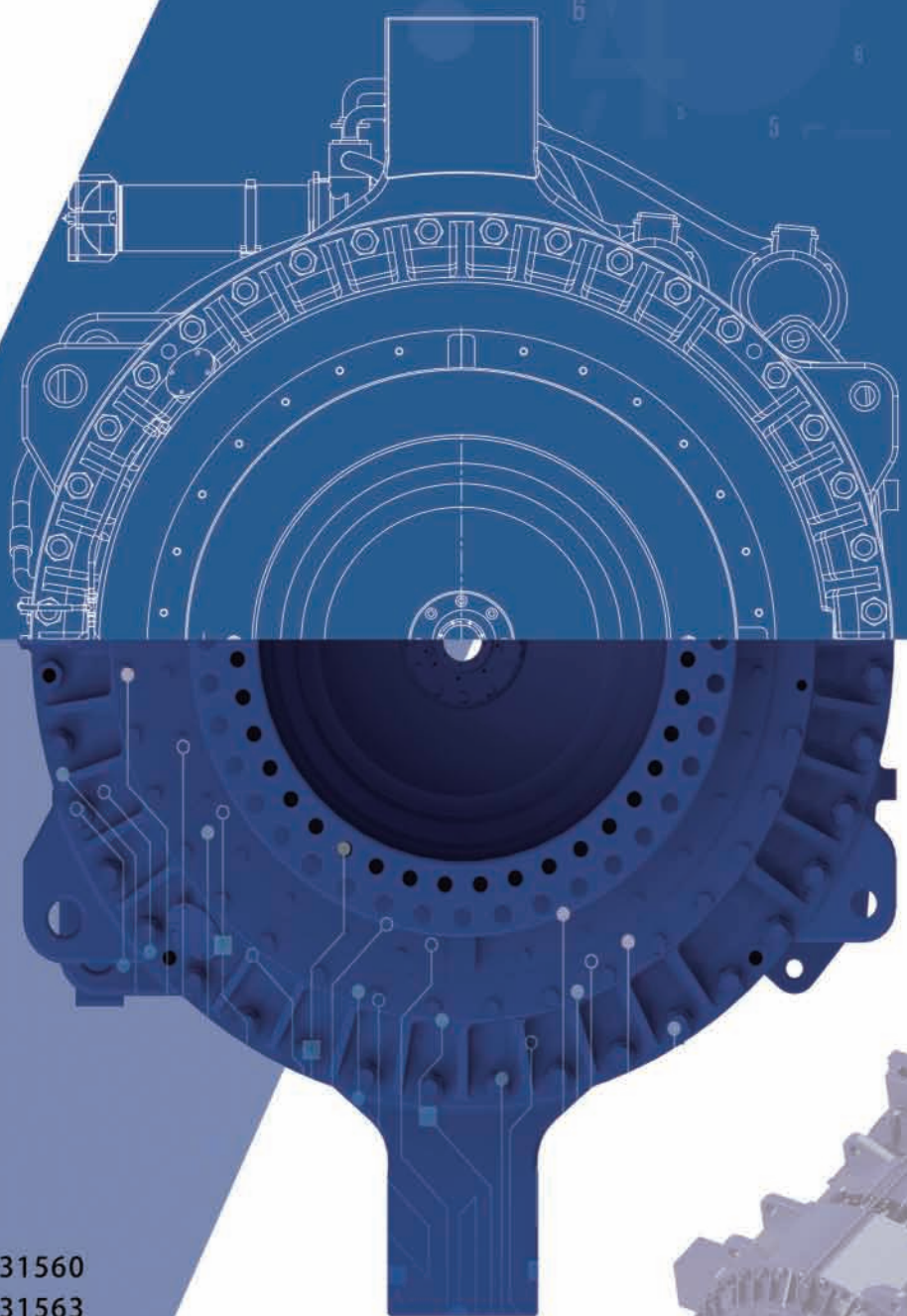
广告

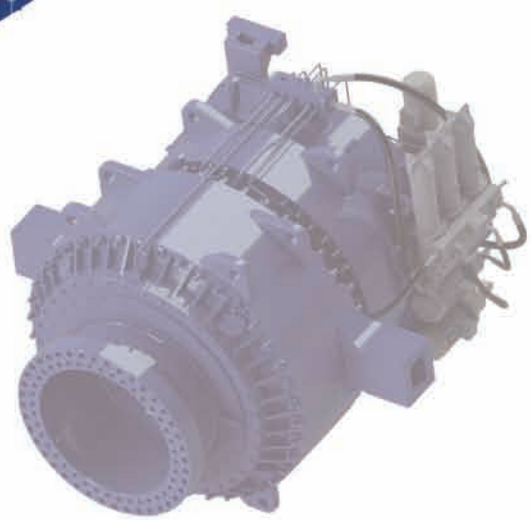
CSSC

重庆齿轮箱有限责任公司

CHONGQING GEARBOX CO.,LTD

改变成就未来





服务电话：023-47231560
销售电话：023-47231563
网址：www.cngpower.cn
邮编：402263
传真：(023) 47231590
地址：重庆江津德感工业园区
电子邮箱：cngpower-fd@chongchi.com

广告

罗特艾德 (rothe erde®)

全球先进的回转支承制造商

徐州罗特艾德回转支承有限公司是由德国蒂森克虏伯集团属下的罗特艾德公司与徐工集团合资组建的回转支承专业制造商,我们的产品在工程机械、风力发电、海洋平台、冶金、矿山、医疗CT机以及军工等领域有着广泛的应用,优质的产品设计、精湛的制造工艺和可靠的质保体系让我们的回转支承产品享誉中外。创立于1861年的德国罗特艾德公司在全球10个国家建有16家回转支承工厂,个性化的解决方案更快捷地为客户提供优质服务。

徐州罗特艾德回转支承有限公司
地址: 徐州经济开发区螺山路15号
邮编: 221004
销售电话: +86 516 87661998
销售传真: +86 516 87767228
sales@xreb.com | www.xreb.com

engineering.tomorrow.together.

工程实力·面向未来·同心同行

数据来自于德国总部网站http://www.thyssenkrupp-rotheerde.com/GB/index.htm

thyssenkrupp

广告